

中国科学院国家天文台 天文学系列

恒星物理

黄润乾 著



第2版



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



中国科学院国家天文台·天文学系列

恒星物理

第2版

黄润乾 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

恒星物理/黄润乾著. —北京:中国科学技术出版社,2012.6
(中国科学院国家天文台·天文学书系)
ISBN 978-7-5046-6114-2

I. ①恒… II. ①黄… III. ①恒星物理学 IV. ①P144

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 132073 号

责任编辑 赵 晖 夏凤金

封面设计 付小鹏

责任校对 韩 玲

责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社

发 行 科学普及出版社发行部

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62173865

传 真 010-62179148

投稿电话 010-62103182

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 400 千字

印 张 36.5

版 次 2012 年 8 月第 2 版

印 次 2012 年 8 月第 1 次印刷

印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-6114-2/P·157

定 价 76.00 元

(凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

本社图书贴有防伪标志,未贴为盗版

中国科学院国家天文台·天文学书系

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》编委会

主 编 王绶琯

副主编 赵 刚 邹振隆 李宗伟

《中国科学院国家天文台天体物理丛书》序

我国组织出版系列的天体物理丛书,滥觞于二十几年前戴文赛先生的倡导,当时改革开放伊始,为了适应研究生制度的恢复,他策划了一个天体物理各个分支学科配套的丛书撰写方案,这在当时以及接下来的一段时间里,为我国天文学的重整旗鼓起了重要的作用.随后的这许多年中,学科高速发展,包括研究生教材在内的国际上的天文佳作源源引进,加上我国科学图书出版的种种变数,使我国天体物理书籍的出版不断自我调整以立足于新的背景,同时各自不断寻求可供依托的机遇.其间逐步淡化了系列化、突出了个性化,这是必然的,也可说是一种进步.但也增加了课题领域的随机性质、少了整体布局.

现在,在新的格局下,国家天文台着手组织一系列天文学丛书,我们接受委托编纂天体物理部分,为了和前面的衔接,这部丛书侧重于专著形式,首先邀请为我国天体物理各个不同分支的研究打下基础的主要科学家们,把他们的长期积累整理成有自己特色的专著.我们相信,这些著作,对于目前站在这些基础上工作和培养新生力量的学者们,将是有益的参考.同时它们也将表征着一个时期我国天体物理著述成果的收结.

总结同时又是开端的准备,我们期待着在若干年后的新版和新辑里,将看到又一个新的开始.



2002年1月于北京

序

恒星物理是当代天体物理的奠基学科. 迄今我们获得的宇宙信息, 包括直接的和间接的, 绝大部分仍是采自恒星发出的光. 到目前, 光学巡天记录下的天文目标约有 10^9 . 而射电、红外、X 射线等不同波段的巡天收集到的目标数目各仅约 10^5 , 10 年后可能各增加到 10^6 . 光学目标中大部分是恒星, 其余的主要是星系. 而星系的光实质上是亿万个恒星的光的混合, 物理解释有赖于对恒星物理的解释.

可以把当代天文研究对象按尺度规模和物理特征分为行星世界、恒星世界和星系—宇宙学世界. 相应的三个研究层次各自沿着自己的发展路线得到开拓. 恒星, 一方面作为星系的“细胞”, 另一方面, 又是行星系统的主体. 三个不同层次的研究通过恒星的研究衔接起来, 把对天文世界的认识贯穿成一个整体. 而在这个整体的衔接里, 不同层次的开拓相互影响.

基于这些, 恒星物理可以认为是天体物理研究中的一个“传统的”出发点.

天体物理研究, 首先是用物理理论来解释天文观测, 同时也常在一定程度上用天文观测来验证和启发物理研究. 因此, 推动天体物理发展的外部因素, 一头是受同时代技术进步的带动而不断提高的天文观测手段; 另一头是, 在研究的进程中与物理学发展的多向交叉. 这些当然完全适用于恒星物理. 与此同时, 推动恒星物理发展的内部因素则首先在于恒星本身, 由于前面说过的原因, 它的结构、起源和演化在天体物理研究中居于基础地位; 另一方面, 众多已经记录在案的恒星“户口”, 数量上仅约为银河系恒星总数的百分之一, 而其中作过不同程度研究的则大约只是在“户口”里万中取一. 因而即使限于今天的眼界内, 我们面前就有着比业已认识到的目标多得多、暗得多的目标等待观测, 而各类已认识和待认识的目标, 更都有着多得多、精细得多的内容需要探索. 恒星世界的研究领域中如此巨大的蕴藏, 给天体物理工作者提供了永不匮竭的推动.

一个世纪中, 恒星物理已经发展为一门成熟的学科. 20 世纪 20 至 30 年代出现了恒星大气和恒星内部结构的经典名著. 理论框架已定, 接下来是半个多世纪中天文观测手段和处理分析能力的巨大进展. 陆续带来的

一系列新的发现,新的研究和新的概念.使恒星物理各个面上的理论不断地得到完善、发展和更新.于是,作为现代天体物理研究“传统的”引导和参考的恒星物理专著.每隔一段时期,就要求调整撰述,以便吸收新的成就,介绍新的方法.这在几代天体物理学家中,是一直这样做的.本书作者多年来也在这一方面作出不懈的努力.他的著作,1986年出版的《恒星的结构和演化》和《恒星大气理论》,以及1990年出版的《恒星振动理论》,都是我国从事天体物理的研究生和专业工作者案头常备书.现在的这部著作,除了基础部分建筑在这三部书上并加以系统化之外,还吸收了作者和他所领导的研究组近年来的研究成果.国际上同类新著的一些特色以及有关材料、计算程序等,也作为他山之石.应用在本书的有关章节里.全书的构思和具体的结构内容.在“目录”和作者的“前言”里,已经有了清楚的说明.这里将不赘述.也许可以多说一句的是:书中着重对恒星物理各种模型的计算方法的介绍,无疑增加了它作为研究参考的分量.

在我国天体物理研究面向着跨世纪发展的时候,这本书的出版是值得欢迎的.

王绶琯

前 言

恒星物理是天体物理中最重要的一个组成部分. 它的内容涉及各类恒星内部的物理过程, 内部结构和演化, 恒星的脉动, 恒星大气层内的辐射转移和光谱特性等. 20 世纪 60 年代前后, 恒星物理的研究突飞猛进, 较为完整而系统的恒星结构和演化理论, 恒星振动理论和恒星大气理论相继形成. 但是, 进入 80 年代后, 由于天文观测手段和处理分析能力的巨大进展, 一大批崭新的天文现象相继发现, 从而冲击着天文学研究的各个领域. 恒星物理也暴露出许多理论的不足与缺陷, 一些陈旧概念相继更新, 新的研究成果不断涌现. 在这种形势下, 系统总结恒星物理各个方面的进展, 撰写新的恒星物理专著, 已成为这一代天体物理学家责无旁贷的任务.

本书就是在这种背景和目的下完成的一部较为全面的恒星物理专著. 这本书以恒星物理的基础理论知识为先导, 然后全面总结和阐述了恒星物理各个领域的内容, 包括恒星内部结构和演化、恒星脉动、恒星大气以及双星理论. 同时还详细介绍了近代计算恒星结构与演化模型, 恒星振动模型, 恒星大气模型和谱线形成模型的方法.

本书的部分章节曾以《中国科学院研究生教材丛书》于 1998 年出版, 此次修订, 删去了书中一些可精简和欠妥当的内容, 同时增添了新的内容: 流体动力学对流理论; 转动恒星的演化; 转动双星的演化以及热核反应的网络计算等等. 原书中的一些错误也在改版中得到改正.

衷心感谢李焱、毕少兰、杨家艳和许华莹同志. 他(她)们对改版提出了宝贵意见, 或是撰写了某些相关内容的初稿. 特别感谢中国科学院国家天文台对本书的资助, 使本书能以《中国科学院国家天文台天体物理丛书》出版.

鉴于作者水平, 改版后仍会有错误和不妥. 敬请读者批评指正.

作者

2006 年 2 月于昆明

再版前言

本书再版时,增添和修改了以下内容:在恒星结构和演化方面,增加了有磁场的恒星演化(§ 9. 6)、相接双星的演化(§ 11. 6),对 neutron 星(§ 10. 5)做了重要增添和修改. 在恒星振动方面,对第十二章做了较大改动,即由原来的双系统恒星振动理论,改为单系统恒星振动理论.

衷心感谢李焱研究员,他对恒星振动部分提出了宝贵意见,并认真审阅了修改稿;衷心感谢张力教授,他增添和修改了 neutron 星部分;衷心感谢宋汉峰副教授、林桂芳博士、杨初源和刘杰英博士,他(她)们对有磁场的恒星演化,提出了宝贵意见,并认真审阅了初稿. 特别感谢中国科学技术出版社,使本书再版.

鉴于作者水平,再版后仍会有错误和不妥. 敬请读者批评指正.

作者

2011 年 11 月于昆明

内 容 简 介

本书全面深入地介绍了恒星物理的主要内容,包括恒星内部结构和演化,恒星振动以及恒星大气理论.它以恒星物理的基础理论知识为先导,然后全面阐述了恒星物理各个领域的内容,特别是近一二十年来取得的重要进展.同时本书还注重介绍了如何进行恒星结构和演化模型,恒星振动模型,恒星大气模型以及谱线形成模型的计算方法.

本书不仅可作为高等院校天体物理专业的研究生和高年级本科生的教材,而且也适合有关天体物理和物理研究工作参考.

目 录

第一章 引言	1
§ 1.1 恒星物理学的内容和方法	1
1.1.1 恒星的结构和演化理论	1
1.1.2 恒星振动理论	1
1.1.3 恒星大气理论	2
§ 1.2 由天文观测得到的一些重要规律	2
1.2.1 赫罗图	2
1.2.2 主序星的质光关系,质量半径关系	6
1.2.3 恒星的光谱	7
第二章 辐射理论	13
§ 2.1 辐射场性质的宏观描述	13
2.1.1 辐射强度	13
2.1.2 辐射通量	15
2.1.3 辐射场的能量密度	17
2.1.4 辐射压	18
2.1.5 半无穷平行平面层中的辐射场	19
§ 2.2 吸收系数,发射系数与散射系数	21
2.2.1 辐射与恒星物质相互作用的微观过程	21
2.2.2 吸收系数与光学深度	22
2.2.3 发射系数,源函数	24
2.2.4 散射系数的一般讨论	25
§ 2.3 黑体及其辐射	27
§ 2.4 辐射转移方程	30
2.4.1 平面直角坐标系中的辐射转移方程	30
2.4.2 平面坐标系中的辐射转移方程	30
2.4.3 平面柱坐标系中的辐射转移方程	31
2.4.4 辐射转移方程的通解	32
2.4.5 平均辐射强度 $J_\nu(\tau_\nu)$, 辐射通量 $F_\nu(\tau_\nu)$ 以及 K 积分的表达式	34

2.4.6 在 $\tau \gg 1$ 时, 辐射转移方程的渐近式	36
第三章 对流	39
§ 3.1 产生对流非稳定性的条件	39
3.1.1 史瓦西(Schwarzschild)判据	40
3.1.2 勒都(Ledoux)判据	42
§ 3.2 温度梯度, 罗斯兰(Rosseland)平均不透明度	43
§ 3.3 混合程理论	47
3.3.1 基本方程组	48
3.3.2 基本方程组的解	52
§ 3.4 对流超射	54
§ 3.5 半对流	57
§ 3.6 流体动力学对流理论	58
第四章 物态方程	63
§ 4.1 热动平衡状态下的统计规律	63
4.1.1 麦克斯韦速度公式	64
4.1.2 玻耳兹曼公式	64
4.1.3 萨哈公式	65
§ 4.2 萨哈公式的适用范围	67
§ 4.3 恒星内部的物态方程	68
4.3.1 完全电离理想气体的物态方程	68
4.3.2 部分电离理想气体的物态方程	73
4.3.3 电子简并情况下的物态方程	78
4.3.4 非理想气体的物态方程	87
§ 4.4 恒星大气的物态方程	90
4.4.1 LTE 物态方程	91
4.4.2 Non-LTE 物态方程	92
第五章 不透明度	98
§ 5.1 束缚—束缚跃迁过程的 κ_{ij} 和 a_{ij}	98
§ 5.2 束缚—自由跃迁过程的 κ_{ik} 与 a_{ik}	105
§ 5.3 自由—自由跃迁过程的 κ_{kk} 与 a_{kk}	108
§ 5.4 散射过程的 σ_e 与 a_e	109
5.4.1 汤姆孙散射	109
5.4.2 康普顿散射	110
5.4.3 在中性原子上的瑞利散射	110

5.4.4 在氢分子上的瑞利散射	111
§ 5.5 几种原子的吸收截面和吸收系数	111
5.5.1 氢的束缚—自由跃迁吸收系数	111
5.5.2 氢的自由—自由跃迁吸收系数	112
5.5.3 负氢离子(H^-)	113
5.5.4 氦的束缚—自由跃迁吸收系数	114
5.5.5 负氦离子	115
§ 5.6 几种主要吸收过程的不透明度近似公式	116
5.6.1 束缚—自由过程	116
5.6.2 自由—自由跃迁过程	117
5.6.3 电子散射过程	117
第六章 热核反应	118
§ 6.1 原子聚合反应与能量产生	118
§ 6.2 热核反应	120
§ 6.3 反应速率	121
§ 6.4 核反应释放的能量 Q	123
§ 6.5 化学组成的变化与核产能率	129
§ 6.6 关于 $\langle \sigma v \rangle$	131
6.6.1 非共振反应	131
6.6.2 共振反应	135
6.6.3 恒星物理中的 $\langle \sigma v \rangle$	136
§ 6.7 电子屏蔽	136
§ 6.8 产能率 ϵ 与温度 T 的关系	142
§ 6.9 氢燃烧	144
§ 6.10 氦燃烧	151
§ 6.11 碳燃烧	153
§ 6.12 氖燃烧	154
§ 6.13 氧燃烧	155
§ 6.14 硅燃烧	156
§ 6.15 中微子能量损失	158
6.15.1 电子对湮灭中微子过程	159
6.15.2 光子中微子过程	160
6.15.3 等离子体中微子过程	160
6.15.4 韧致辐射中微子过程	161

第七章 恒星结构与演化模型	163
§ 7.1 恒星结构与演化模型计算的任务和基本假设	163
§ 7.2 基本方程组	164
7.2.1 质量分布方程	164
7.2.2 流体静力学平衡方程	164
7.2.3 能量平衡方程	165
7.2.4 能量传递方程	167
7.2.5 化学组成变化方程	167
§ 7.3 物质函数与边界条件	169
§ 7.4 恒星结构模型的数值积分方法	171
7.4.1 积分网点的选取与差分方程的建立	172
7.4.2 拟合点及拟合点处的边界条件	173
7.4.3 内部积分	175
7.4.4 表面积分	179
7.4.5 表面量与拟合点量间的关系,拟合程度的判别	181
§ 7.5 解的唯一性问题	183
§ 7.6 位力定理	183
7.6.1 表面压强为零的情况	183
7.6.2 表面压强不为零的情况	185
§ 7.7 时标	186
7.7.1 动力学时标	186
7.7.2 热时标(开尔文—亥姆霍兹时标)	188
7.7.3 核时标	189
§ 7.8 一种最简单的恒星结构模型——多方模型	189
7.8.1 Emden 微分方程	191
7.8.2 解的特性	193
7.8.3 由 Emden 微分方程的解确定恒星的结构	195
第八章 恒星的早期演化	197
§ 8.1 恒星的形成	197
8.1.1 星际云的引力非稳定性	198
8.1.2 星际云中气体球的引力非稳定性	202
8.1.3 碎裂过程	204
§ 8.2 主序前的演化	206
8.2.1 赫罗图中的 Hayashi 线	207

8.2.2 由 Hayashi 线到主序的演化	214
8.2.3 主序前恒星内部物理量变化特性	218
§ 8.3 主序	220
8.3.1 零龄主序	220
8.3.2 主序星的特性	221
8.3.3 主序带	225
8.3.4 其他主序	228
第九章 从主序开始的演化进程	231
§ 9.1 中等质量星的演化	232
9.1.1 主序阶段	232
9.1.2 跨越赫罗图中的空隙区	234
9.1.3 氦燃烧阶段	234
9.1.4 氦燃烧以后的演化	235
9.1.5 AGB 阶段	236
9.1.6 几种可能的演化结局	237
§ 9.2 小质量星的演化	238
9.2.1 主序阶段	238
9.2.2 向巨星分支过渡	241
9.2.3 红巨星分支阶段	241
9.2.4 氦闪耀到零龄水平分支	242
9.2.5 AGB 阶段	244
9.2.6 演化结局	245
§ 9.3 演化过程中的一些物理问题	245
9.3.1 Schönberg—Chandrasekhar 极限	246
9.3.2 等温核收缩的特性	248
9.3.3 电子简并核收缩升温的临界质量	251
9.3.4 热核反应的非稳定性	254
9.3.5 对流超射对恒星演化的影响	260
§ 9.4 大质量星的演化	262
9.4.1 大质量星的赫罗图	263
9.4.2 星风物质损失对大质量星演化的影响	264
9.4.3 对流、金属丰度及物质混合等效应对大质量星演化的影响	267
9.4.4 不同质量范围的大质量星的演化	270

§ 9.5 转动恒星的演化	272
9.5.1 离心力效应	273
9.5.2 子午环流与剪切湍流效应	275
§ 9.6 有磁场的恒星演化	277
9.6.1 基础知识	277
9.6.2 恒星中磁场产生机理	281
9.6.3 有磁场和转动的恒星结构方程	285
9.6.4 角动量迁移和化学元素迁移	286
9.6.5 星风磁滞效应	288
第十章 恒星演化的最后阶段	289
§ 10.1 不同质量恒星的最后阶段	289
10.1.1 初始质量	289
10.1.2 物质损失或物质吸积	290
§ 10.2 白矮星	290
10.2.1 白矮星的结构理论——Chandrasekhar 理论	291
10.2.2 外壳的结构	298
10.2.3 白矮星的冷却过程	300
§ 10.3 弱相互作用过程	303
10.3.1 中微子能量损失	304
10.3.2 光致蜕变过程	304
10.3.3 电子捕获过程	307
§ 10.4 超新星	308
10.4.1 超新星的分类	308
10.4.2 II 型超新星	311
10.4.3 I 型超新星	315
§ 10.5 中子星	320
10.5.1 中子星的形成	321
10.5.2 中子星内部的物质组成与密度分布	322
10.5.3 中子星的结构方程和基本参数	324
10.5.4 中子星的冷却过程	325
10.5.5 脉冲星	326
第十一章 相互作用双星系统的演化	334
§ 11.1 洛希模型	334
11.1.1 洛希等势面	334

11.1.2	洛希瓣的临界半径	336
11.1.3	相互作用双星系统的分类	339
§ 11.2	双星系统的守恒演化	340
11.2.1	物质交换	340
11.2.2	角动量转换	342
11.2.3	轨道周期变化	342
11.2.4	几种不同情况的双星演化	344
11.2.5	演化结局	351
§ 11.3	大质量双星系统的非守恒演化	352
11.3.1	引言	352
11.3.2	潮汐效应和自转效应对星风物质损失率的影响	353
11.3.3	互相辐射效应对星风物质损失率的影响	355
11.3.4	星风造成的角动量损失	356
11.3.5	轨道周期的变化	356
11.3.6	辐射对洛希瓣及物质交换的影响	357
11.3.7	碰撞星风冲激波与 X 射线源	359
11.3.8	双星系统不因超新星爆炸而破坏的条件	362
11.3.9	形成有公共外壳系统的条件及外壳丢失后的周期	364
11.3.10	双星中的吸积与 X 射线辐射	366
11.3.11	演化成为 WR+O 型双星系统	369
11.3.12	演化成为小质量 X 射线双星系统	372
11.3.13	演化成为大质量 X 射线双星系统	373
11.3.14	大质量 X 射线双星的演化结局	373
§ 11.4	小质量双星系统的非守恒演化	375
11.4.1	小质量双星系统	375
11.4.2	小质量双星系统是非守恒的	377
11.4.3	推动小质量双星系统非守恒演化的几种可能机制	377
11.4.4	小质量双星系统的演化结局	378
§ 11.5	转动双星的演化	378
11.5.1	等势面, 等价球	379
11.5.2	结构方程组	380
11.5.3	化学元素的变化	382
11.5.4	物质交换条件	383
11.5.5	系统转动角速度变化和两子星间的轨道距离变化	383