



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 27

恒星结构演化引论

李 焱 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

前 沿 系 列 · 2 7

恒星结构演化引论

李 焱 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

恒星结构演化引论/李焱编著. —北京: 北京大学出版社, 2014. 3

(中外物理学精品书系·前沿系列)

ISBN 978-7-301-23987-2

I. ①恒… II. ①李… III. ①恒星结构-恒星演化-研究 IV. ①P142.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 039560 号

书 名: 恒星结构演化引论

著作责任者: 李 焱 编著

责任编辑: 刘 啸

标准书号: ISBN 978-7-301-23987-2/O·0268

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 19 印张 362 千字

2014 年 3 月第 1 版 2014 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 52.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

“中外物理学精品书系”

编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王牧	王鼎盛	石兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱星
向涛	刘川*	许宁生	许京军	张酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭卫*
资剑	龚旗煌	崔田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础，同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天，物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴，而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到，改革开放三十多年来，随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展，我国物理学取得了跨越式的进步，做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下，近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势，在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看，尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书，但系统总结物理学各门类知识和发展，深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源，并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考，仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展，特别是展现近年来中国物理学家的研究水平和成果，北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”，试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家，确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富，涵盖面广，可读性强，其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结，也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示；既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态，也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说，“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌，是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是，在把西方物理的精华要义“请进来”的同时，也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻，引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态，可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面，改革开放几十年来，我国的物理学研究取得了长足发展，一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域，使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解，不仅充分展示出中国物理学研究和积累的“硬实力”，也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”，对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是，“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20 世纪以来，中国物理界诞生了很多经典作品，但当时大都分散出版，如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中，读者们对这些论著也都是“只闻其声，未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫，对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值，不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献，充分发挥其应有的传世育人的作用，更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统，真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在 2006 年中国科学技术大会上指出，“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径，是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新，而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信，这套“中外物理学精品书系”的出版，不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣，也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展，为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士，北京大学教授
王恩哥

2010 年 5 月于燕园

谨以此书纪念我的导师黄润乾先生

内 容 简 介

本书系统介绍了恒星结构演化研究的主要观测事实、恒星物质的状态方程、发生在恒星内部的热核燃烧过程、辐射在恒星内部的传递,以及恒星内部的对流传热与对流物质混合等主要物理过程及其处理方法,简略地介绍了恒星结构演化模型及其计算方法,并且较详细地介绍了不同质量恒星的结构特征及其不同演化阶段的主要性质. 本书能够帮助读者系统地了解恒星内部结构演化研究发展的历史及现状,熟悉不同质量恒星的内部结构特征,了解不同恒星在演化进程中的联系,以及不同质量恒星的演化结局,并初步掌握恒星结构演化的数值模拟方法.

本书可作为高等院校理科高年级本科生和研究生的教材,也可供有关科研人员参考.

常用物理和天文常数

名称	符号与数值
天文单位	$\text{AU} = 1.495978707 \times 10^{13} \text{ cm}$
秒差距	$\text{pc} = 3.08568 \times 10^{18} \text{ cm}$
光年	$\text{ly} = 9.46053 \times 10^{17} \text{ cm}$
原子质量单位	$m_{\text{u}} = 1.660538782 \times 10^{-24} \text{ g}$
电子静止质量	$m_{\text{e}} = 9.10938215 \times 10^{-28} \text{ g}$
基本电荷量	$e = 4.80320427 \times 10^{-10} \text{ statC}$
万有引力常数	$G = 6.67428 \times 10^{-8} \text{ dyn} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-2}$
阿伏伽德罗常数	$N_{\text{A}} = 6.02214179 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
气体常数	$\mathfrak{R} = 8.314472 \times 10^7 \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
真空中光速	$c = 2.99792458 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$
普朗克常数	$h = 6.62606896 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$
玻尔兹曼常数	$k = 1.3806504 \times 10^{-16} \text{ erg} \cdot \text{K}^{-1}$
斯特藩-玻尔兹曼常数	$\sigma = 5.6704 \times 10^{-5} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$
黑体辐射能量密度常数	$a = 7.56566 \times 10^{-15} \text{ erg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-4}$
费米常数	$G_{\text{F}} = 1.43585 \times 10^{-49} \text{ erg} \cdot \text{cm}^3$
太阳质量	$M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{33} \text{ g}$
太阳半径	$R_{\odot} = 6.9566 \times 10^{10} \text{ cm}$
太阳光度	$L_{\odot} = 3.839 \times 10^{33} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$
太阳年龄	$\tau_{\odot} = 4.57 \text{ Gyr}$

目 录

第 1 章 恒星的分类与赫罗图	1
§1.1 恒星的光度	1
1.1.1 视星等	1
1.1.2 绝对星等	2
1.1.3 色指数和热改正	3
§1.2 恒星的光谱	4
1.2.1 有效温度	4
1.2.2 光谱型	5
1.2.3 光度型和 MK 分类法	7
§1.3 恒星的星族	8
§1.4 赫罗图与恒星的一些观测性质	8
1.4.1 赫罗图	8
1.4.2 恒星的一般性质	9
1.4.3 主序星的质光关系和质量-半径关系	10
1.4.4 星团及其赫罗图	11
第 2 章 恒星物质的状态方程	14
§2.1 热力学方程与最小自由能原理	14
2.1.1 热力学第一定律和第二定律	14
2.1.2 自由能	15
2.1.3 特性函数	15
2.1.4 热力学量之间的关系	16
§2.2 正则系综	17
2.2.1 系统微观状态的描述	17
2.2.2 正则系综	18
2.2.3 正则系综的热力学函数	19
2.2.4 理想气体的热力学函数	20
2.2.5 黑体辐射的热力学函数	21
§2.3 完全电离混合气体	22
2.3.1 元素的质量丰度	22
2.3.2 混合气体的平均相对原子质量	22

2.3.3	完全电离混合气体的状态方程	23
§2.4	部分电离混合气体	24
2.4.1	电离平衡方程	24
2.4.2	部分电离混合气体的状态方程	26
2.4.3	带电粒子的库仑相互作用	28
§2.5	简并情况下的电子气体	31
2.5.1	电子气体的费米-狄拉克统计	31
2.5.2	简并电子气体的热力学函数	31
2.5.3	电子气体的状态方程	32
2.5.4	完全简并情况下电子气体的状态方程	34
第 3 章	热核反应与元素的核合成	36
§3.1	恒星内部的热核燃烧序列	36
3.1.1	恒星的能量来源	36
3.1.2	原子核的结合能	37
3.1.3	热核聚变反应	38
3.1.4	恒星内部的热核燃烧序列	39
§3.2	热核反应速率	40
3.2.1	热核反应速率	40
3.2.2	核反应的截面	42
3.2.3	量子隧道效应	45
3.2.4	电子屏蔽	46
3.2.5	化学组成的变化与核产能率	47
§3.3	氢燃烧过程	48
3.3.1	质子链	48
3.3.2	碳氮氧循环	52
§3.4	氦燃烧过程	59
3.4.1	3α 反应以及氦燃烧产能率	60
3.4.2	α 反应链	62
§3.5	碳燃烧、氖燃烧和氧燃烧过程	62
3.5.1	碳燃烧过程	63
3.5.2	氖燃烧过程	63
3.5.3	氧燃烧过程	65
§3.6	硅燃烧过程	66
3.6.1	光致蜕变反应与准平衡群	66
3.6.2	中子富余度与硅燃烧产物	67

3.6.3 核统计平衡	69
§3.7 中子俘获过程与超重核素的核合成	69
3.7.1 慢中子俘获过程 (s 过程)	70
3.7.2 快中子俘获过程 (r 过程)	71
3.7.3 光致蜕变质子增丰过程 (p 过程)	72
§3.8 中微子过程	73
3.8.1 弱相互作用	74
3.8.2 中微子与物质的相互作用截面	74
3.8.3 电子对湮没中微子过程	76
3.8.4 光子中微子过程	77
3.8.5 等离子体中微子过程	79
第 4 章 辐射转移过程与不透明度	83
§4.1 辐射场的宏观描述	83
§4.2 辐射与介质的相互作用	85
4.2.1 吸收系数和发射系数	85
4.2.2 辐射与介质相互作用的微观过程	86
§4.3 辐射转移方程	87
4.3.1 平面平行层的辐射转移方程	87
4.3.2 辐射转移方程的通解	88
4.3.3 辐射转移方程的渐近解	88
4.3.4 不透明度	89
4.3.5 灰大气模型	90
§4.4 恒星物质的不透明度	91
4.4.1 量子跃迁	91
4.4.2 束缚-束缚跃迁过程	93
4.4.3 束缚-自由跃迁过程	96
4.4.4 自由-自由跃迁过程	100
4.4.5 散射过程	102
4.4.6 不透明度的近似公式	103
第 5 章 恒星内部的湍流热对流	105
§5.1 对流产生的判据	105
§5.2 热对流运动的基本方程组	108
5.2.1 描述流体运动的基本方程组	108
5.2.2 热对流的布辛尼斯克近似	108
5.2.3 热对流运动的无量纲控制参数	110

5.2.4	热对流运动的一般特征	110
§5.3	恒星对流的混合长理论	112
§5.4	湍流的 RANS 方程组	114
5.4.1	湍流的一般特征	114
5.4.2	流场的雷诺分解	115
5.4.3	湍流涨落量的关联函数	116
5.4.4	流场平均量的方程组	116
5.4.5	湍流关联量的 RANS 方程组	117
§5.5	湍流的 $k-\varepsilon$ 模型	119
5.5.1	标准 $k-\varepsilon$ 模型	119
5.5.2	标准 $k-\varepsilon$ 模型的参数	120
5.5.3	标准 $k-\varepsilon$ 模型的局地稳态解	120
§5.6	恒星对流区的结构模型	121
5.6.1	恒星对流区的物理结构	121
5.6.2	对流涡胞的结构模型	121
5.6.3	流场的平均剪切率模型	123
5.6.4	湍流热通量模型	124
5.6.5	恒星对流区的温度结构	126
§5.7	恒星对流的 $k-\varepsilon$ 模型	127
5.7.1	模型参数 c_b 的选择	127
5.7.2	湍流特征长度的混合长模型	127
5.7.3	$k-\varepsilon$ 模型的局地稳态解	128
第 6 章	恒星的结构演化模型	129
§6.1	恒星内部物理过程的典型时标	129
6.1.1	动力学时标	129
6.1.2	热时标	131
6.1.3	核时标	131
§6.2	恒星结构基本方程组	131
6.2.1	引力势的泊松方程	131
6.2.2	流体静力学平衡方程	132
6.2.3	能量守恒方程	133
6.2.4	热通量方程	133
§6.3	元素丰度演化方程	134
6.3.1	热核反应	134
6.3.2	对流混合	135

6.3.3 热扩散	135
6.3.4 元素丰度演化方程	137
§6.4 边界条件和初始条件	137
6.4.1 中心边界条件	137
6.4.2 表面边界条件	137
6.4.3 初始条件	138
6.4.4 解的存在和唯一性问题	139
§6.5 位力定理	139
6.5.1 单原子理想气体	139
6.5.2 一般理想气体	140
§6.6 多方模型	140
6.6.1 多方关系	140
6.6.2 艾姆顿方程	141
6.6.3 艾姆顿方程的解	142
6.6.4 恒星的多方模型	143
§6.7 等温核的性质	144
§6.8 基本方程组的数值求解方法	146
6.8.1 差分方案	146
6.8.2 无量纲化变量和基本方程组	147
6.8.3 基本方程组的离散化	148
6.8.4 边界条件的离散化	148
6.8.5 解恒星结构方程组的迭代算法 —— 亨叶方法	149
§6.9 元素丰度演化方程的求解	151
第 7 章 恒星的主序和主序前演化	153
§7.1 恒星的形成	153
7.1.1 引力的金斯不稳定性	153
7.1.2 分子云的坍缩与碎裂	154
7.1.3 原恒星的形成	154
7.1.4 恒星形成过程的观测证据	155
§7.2 主序前的演化	156
7.2.1 林中四郎线	156
7.2.2 林中四郎线上恒星的内部结构	158
7.2.3 沿林中四郎线的演化	159
7.2.4 朝向主序的演化	160
§7.3 零年龄主序	161

7.3.1	拟合模型	161
7.3.2	数值模型	165
7.3.3	影响零年龄主序的一些物理因素	167
7.3.4	零年龄主序的质量极限	167
第 8 章	恒星主序阶段的演化	170
§8.1	下主序恒星的演化	171
8.1.1	氢燃烧过程	172
8.1.2	内部结构与演化	172
8.1.3	太阳模型	175
§8.2	上主序恒星的演化	178
8.2.1	氢燃烧过程	179
8.2.2	星风物质损失过程	179
8.2.3	对流与自转引起的物质混合过程	180
8.2.4	内部结构与演化	182
§8.3	极亮主序恒星的演化	185
8.3.1	恒星的临界状态	185
8.3.2	内部结构与演化	187
§8.4	恒星按质量分类	188
第 9 章	小质量恒星主序后的演化	191
§9.1	小质量恒星的演化图景	191
§9.2	沿红巨星分支的演化	192
9.2.1	简并氦核的性质	193
9.2.2	沿红巨星分支的演化	194
9.2.3	不同物理因素对红巨星分支位置的影响	196
§9.3	氦闪耀	196
§9.4	水平分支阶段的演化	199
9.4.1	零年龄水平分支	199
9.4.2	中心氦燃烧阶段	201
9.4.3	水平分支上的缺口 —— 天琴座 RR 变星	204
§9.5	沿渐近巨星分支的演化	205
9.5.1	早期渐近巨星分支阶段	205
9.5.2	壳层源内热核燃烧过程的稳定性	208
9.5.3	热脉冲渐近巨星分支阶段	209
9.5.4	慢中子过程核合成	212
9.5.5	渐近巨星分支之后的演化	213

第 10 章 中等质量恒星主序后的演化	216
§10.1 中等质量恒星的演化图景	216
§10.2 主序之后的演化	218
10.2.1 勋伯格-钱德拉塞卡极限	218
10.2.2 赫氏空隙区	220
§10.3 早期红巨星分支的演化	221
§10.4 中心氢燃烧阶段的演化	222
10.4.1 早期中心氢燃烧阶段	222
10.4.2 第二簇群与蓝回绕	223
10.4.3 造父变星	225
§10.5 沿渐近巨星分支的演化	226
10.5.1 早期渐近巨星分支阶段	227
10.5.2 热脉冲渐近巨星分支阶段	228
10.5.3 慢中子过程核合成	229
10.5.4 超级渐近巨星分支	229
第 11 章 大质量恒星主序后的演化	231
§11.1 大质量恒星演化的一般图景	231
§11.2 中心氢燃烧阶段的演化	232
11.2.1 质量 $M < 15M_{\odot}$ 的恒星的演化	232
11.2.2 质量在 $15M_{\odot} < M < 40M_{\odot}$ 范围内的恒星的演化	233
11.2.3 质量在 $40M_{\odot} < M < 60M_{\odot}$ 范围内的恒星的演化	235
11.2.4 质量 $M > 60M_{\odot}$ 的恒星的演化	236
11.2.5 慢中子过程核合成	237
§11.3 中微子能量损失过程与恒星中心核的演化	238
§11.4 晚期各个热核燃烧阶段的演化	239
11.4.1 碳燃烧阶段的演化	240
11.4.2 氦燃烧阶段的演化	242
11.4.3 氧燃烧阶段的演化	243
11.4.4 硅燃烧阶段的演化	244
§11.5 超新星爆发之前的演化	246
11.5.1 铁核坍缩过程	246
11.5.2 电子俘获过程	246
11.5.3 电子对非稳定性	247
第 12 章 超新星与致密天体	248
§12.1 超新星及其分类	248

§12.2 内核坍缩型超新星	251
12.2.1 内核的坍缩	251
12.2.2 反弹与激波	252
12.2.3 超新星爆发过程中的能量平衡	253
12.2.4 中微子输运过程	255
12.2.5 爆发机制	256
12.2.6 爆炸式核合成	257
12.2.7 光变曲线与光谱特征	258
§12.3 热核爆炸型超新星	260
12.3.1 恒星的热核爆炸现象	260
12.3.2 爆炸式热核燃烧过程	261
12.3.3 简并碳氧核的热核爆炸模型	263
12.3.4 电子对非稳定性热核爆炸模型	264
12.3.5 光变曲线	266
12.3.6 Ia 型超新星模型	268
§12.4 白矮星	269
12.4.1 白矮星的内部结构	269
12.4.2 白矮星外包层的结构	271
12.4.3 白矮星的演化 —— 冷却过程	274
§12.5 中子星	275
12.5.1 中子星种类和观测特性	276
12.5.2 状态方程与中子星的内部结构	278
12.5.3 中子星的演化	280
参考文献	282