

天体物理基础和方法丛书

恒星的 结构和演化

黄润乾 编著

科学出版社



天体物理基础和方法丛书

恒星的结构和演化

黄润乾 编著

科学出版社

1986

内 容 简 介

本书系统地阐述了恒星结构与演化的基本理论,详细地介绍了恒星演化模型的计算方法,对双星系统演化理论作了详细的探讨,并且还介绍了近几十年来恒星演化理论的新发展,诸如对流超射理论以及对恒星演化的影响、热核反应的非稳定性问题、赫罗图中 Hayashi 线的理论证明等,本书可供天体物理工作者和研究生阅读,也可供物理工作者参考。

天体物理基础和方法丛书

恒星的结构和演化

黄润乾 编著

责任编辑 夏墨英

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

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

*

1986 年 4 月第一版 开本: 787×1092 1/32

1986 年 4 月第一次印刷 印张: 11 1/4

印数: 0001—1,800 字数: 253,000

统一书号: 13031·3140

本社书号: 4417·13—5

定价: 2.65 元

《天体物理基础和方法丛书》编委会

主 编：王绶琯

编 委：陈 彪 方励之 曲钦岳 李启斌

序

1978年,已故戴文赛教授在病榻上和几位同志倡议编写一部天体物理学丛书。这个倡议得到了天文界的响应和出版界的支持。当时“四害”已除,科学园地中严冰初破,万象春回。广大天文工作者怀着急切的心情整顿自己的队伍,重新投入到学科建设。文赛同志和大家意识到整顿的第一步应是重打基础。我们失去的这十年,正是国际上天文学突飞猛进的十年。随着这一时期射电、空间和地面天文实测手段的长足进步,重大天文发现接踵而来,理论物理学和天文学的学科渗透空前活跃。这一切给当代天文研究带来了一个面临飞跃的前景。面对这个前景,如何夺回十年动乱中失去的时间是我们当前两代天文工作者必须首先考虑的问题。于是,大家设想,在起步之际是否可以组织天文战线上的“老兵”,分头先就各人所长的学科领域,系统地刷新知识,写成讲义,互教互学;并在此基础上整理成书,用以为源源加入天文队伍的“新兵”及时地搭桥铺路。书拟分两辑。这一辑侧重于理论天体物理学的重要分支和几个主要天文实测手段的技术和方法,读者对象为天体物理专业的研究生,当然也适于天文和有关物理学科的科研、教学工作参考。

现在丛书各册即将陆续问世。几年来我们国家经历了拨乱反正,我国的天文工作者和全国人民步调一致,正抱着振兴祖国天文事业的志向,稳步登攀科学研究的崎岖道路。在这伟大的旅程中,我们将以这部丛书作为路旁岩石上的一方铭镌,记载着这一年代我国天文学的里程,并以此纪念我们的同志、

本丛书许多作者的老师和朋友——为新中国天文建设事业殚
竭心力、奋斗一生的戴文赛教授。

王绶琯

前 言

恒星结构与演化理论是天体物理的一个重要组成部分，它是研究恒星内部的结构以及恒星如何演化的科学。近几十年来，恒星结构与演化理论发展十分迅速，形成一个完整的理论体系，并在解释许多天体的演化和许多由天文观测得到的经验规律方面，取得了辉煌的成就。

编写这部《恒星的结构与演化》，旨在将这一课题的基本理论以及近几十年所取得的一些主要进展，介绍给我国天体物理工作者。作者希望，这本书的出版能够引起天体物理界有更多的人重视恒星结构与演化的研究。

本书承蒙王绶琯先生热诚关怀，并提出了许多宝贵意见。此外，联邦德国 A. Weigert 教授、紫金山天文台龚树模先生，还有许多同志的热情帮助，作者在此谨向他们表示深切的感谢。

由于作者水平所限，书中错误和不当之处必然不少，敬请读者批评指正。

黄润乾

目 录

序	1
前言	iii
符号表	1
第一章 基础知识	18
§ 1. 恒星结构与演化理论的任务	18
§ 2. 由天文观测得到的一些重要规律	19
1. 赫罗图	19
2. 质-光关系	25
3. 质量-半径关系	26
第二章 基本方程组	28
§ 1. 简化假设	28
§ 2. 恒星的质量分布	28
§ 3. 流体静力学平衡方程	29
1. 流体静力学平衡方程	29
2. 流体静力学时标	30
3. 恒星中心值的估算	32
§ 4. 维里定理	33
1. 表面压强为零的情况	33
2. 表面压强不为零的情况	35
§ 5. 能量定理	36
1. 能量定理	36
2. 核反应时标与开尔芬-亥姆霍茨时标	40
§ 6. 辐射转移方程	42
1. 辐射场理论的一些基本概念	42

2. 辐射转移方程	44
3. 温度梯度的表达式, κ 的罗斯兰平均值	46
§ 7. 产生对流非稳定性的判别条件	49
1. 史瓦西判别条件	49
2. 勒都判别条件	52
§ 8. 混合程理论	53
1. 概述	53
2. 混合程理论的基本方程组	54
3. 基本方程组的解	59
4. 对流超射问题	61
第三章 物质函数	65
§ 1. 物态方程	65
1. 总压强	65
2. 平均分子量	66
3. 沙哈方程	68
4. 部分电离时的电子压强	70
5. 部分电离时, 一些热力学量的表达式	71
§ 2. 电子气体的简并	77
1. 费密分布	77
2. 简并参量 ψ	80
3. 在简并情况下, 密度 ρ 、电子压强 P_e 及内能 U_e 的 表达式	82
4. 完全简并情况下的物态方程	85
5. 在简并情况下热力学量 C_P , ∇_{ad} 的表达式	87
§ 3. 不透明度	91
1. 辐射与物质的相互作用过程	91
2. 吸收系数与原子吸收截面	92
3. 束缚-自由跃迁过程的 κ_{th} 与 α_{th}	94
4. 几种主要吸收过程的原子吸收截面	97
5. 几种主要吸收过程的不透明度近似公式	100

6. 几种不透明度数值的比较	101
7. 电子气体的热传导	103
8. 不透明度表格	105
§ 4. 热核反应与产能率	105
1. 原子聚合反应与能量产生	105
2. 热核反应	121
3. 反应速率 r 与产能率 ϵ_N	122
4. 关于 $\langle \sigma v \rangle$	124
5. ϵ_N 与 T 的关系	128
6. 氢燃烧	130
7. 氦燃烧	134
8. 碳, 氧和氦燃烧	136
9. 中微子能量损失	137
§ 5. 化学组成的变化	139
1. 定义	139
2. 在辐射平衡区域内化学组成的变化	140
3. 在对流区域内化学组成的变化	143
第四章 恒星结构与演化模型的计算方法	145
§ 1. 综述	145
1. 恒星结构与演化模型计算的任务	145
2. 基本方程组与物质函数	146
3. 边界条件	147
4. 对表面边界条件的讨论	149
5. 解的唯一性问题	154
§ 2. 多方方法	155
1. 概述	155
2. Emden 微分方程	157
3. 由 Emden 微分方程的解确定恒星的结构	159
§ 3. Henyey 方法	162
1. 恒星的分层, 微分方程组改写为差分方程组	162

2. 拟合点及拟合点处的边界条件	166
3. 内部积分	167
4. 表面积分	177
5. 表面量与拟合点量间的关系, 拟合程度的判别	180
6. 化学组成变化的计算	182
7. 演化时间间隔 τ 的选取	183
8. $\bar{\kappa}$ 值的内插计算	185
9. 计算公式一览表	191
第五章 恒星演化	201
§ 1. 主序前的演化	201
1. 恒星的形成	201
2. 赫罗图中的 Hayashi 线	202
3. 由 Hayashi 线到主序的演化	211
4. 多方模型收缩的特点	215
§ 2. 主序阶段	219
1. 主序的意义	219
2. 主序模型计算结果	220
§ 3. 主序以后的演化	224
1. 中等质量星的演化情况	226
2. 热核反应的非稳定性问题	237
3. 大质量星的演化情况	244
4. 小质量星的演化情况	246
5. 水平分支星	256
§ 4. 广义主序	257
§ 5. 对恒星演化有重大影响的几个问题	259
1. 对流超射对恒星演化的影响	259
2. 质量损失对恒星演化的影响	268
3. 不透明度对恒星演化的影响	271
§ 6. 超新星爆发	273
第六章 脉动星	278

§ 1. 概述	278
§ 2. 绝热径向脉动理论	283
§ 3. 非绝热径向脉动理论	290
1. 扰动方程组	290
2. 非绝热程度的讨论	293
3. 边界条件	294
4. 能量积分	296
5. 计算步骤	299
§ 4. 理论计算结果与实际观测的比较	300
第七章 双星系统的演化	304
§ 1. 概述	304
§ 2. 罗希模型和双星系统的分类	306
§ 3. 质量与角动量守恒情况下的质量交换问题	311
1. 质量交换与双星系统的变化	311
2. 关于主序星的稳定性问题	314
§ 4. 质量与角动量守恒时双星系统的演化	316
1. 情况 A 的演化	317
2. 情况 B 的演化(大质量星情况)	319
3. 情况 B 的演化(小质量星情况)	321
4. 情况 C 的演化	325
5. 情况 BB, BC 的演化	328
§ 5. 质量和角动量不守恒情况下, 双星系统的演化	330
1. X 射线双星系统的演化	335
2. 灾变双星	337
第八章 结束语	338
参考文献	344

符 号 表

拉丁字母

A	质量数
A	功
A	双星系统中两子星间的距离
A	$2\left[\frac{4}{9}(\nabla_r - \nabla_{ad}) + \left(\frac{19^3}{27^3} - \frac{1}{9}\right)U^2\right]U$
A	$\frac{3R}{4\pi\mu}$
A	$\frac{1}{Y^3} \left(\frac{\varepsilon_{3\alpha \rightarrow O^{18}}}{Q_{3\alpha}/12m_p} \right)$
A_i	第 i 种原子的原子量
$A_\kappa(i)$	κ 表格的化学权重
A_X, A_Y, A_Z	计算化学权重的系数
A_Z	重元素的原子量
a	辐射密度常数
a_s	散射过程的原子吸收截面
a_{if}	束缚-束缚跃迁过程的原子吸收截面
a_{fk}	束缚-自由跃迁过程的原子吸收截面
a_{kk}	自由-自由跃迁过程的原子吸收截面
a_l	分布在 l 能级上的费密子数
a_ν	频率为 ν 的原子吸收截面
a_1, a_2	拟合点边界条件中的系数
B	$\frac{4\pi^2 z_1 z_2 e^2}{\hbar} \left(\frac{m}{2} \right)^{1/2}$

B	$\frac{C_1 G}{4\pi}$
B	$\frac{1}{Y} \left(\frac{\varepsilon_{C^{12} \rightarrow O^{16}}}{Q_{C^{12} \rightarrow O^{16}}/4m_p} + \frac{\varepsilon_{O^{16} \rightarrow Ne^{20}}}{Q_{O^{16} \rightarrow Ne^{20}}/4m_p} \right)$
$B_\nu(T), B(\nu, T)$	黑体辐射光度
b_1, b_2	拟合点边界条件中的系数
C	$\frac{1}{Y} \left(\frac{\varepsilon_{C^{12} \rightarrow O^{16}}}{Q_{C^{12} \rightarrow O^{16}}/4m_p} \right)$
C	$\frac{3}{64\pi^2 ac}$
C'	双星系统角动量相对变化值 $\left(\frac{\Delta J}{J} \right)$
C_v	定容比热
C_p	定压比热
C_1	$\int_0^M \frac{M_r dM_r}{r} / \frac{M^2}{R}$
C_1	$8\pi\sqrt{2} m_p \left(\frac{mc}{h} \right)^3$
C_2	$\frac{16\pi}{3} \sqrt{2} mc^2 \left(\frac{mc}{h} \right)^3$
C_3	$8\pi\sqrt{2} mc^2 \left(\frac{mc}{h} \right)^3 m_p/m$
c	光速
c_1	$\frac{4\pi P_0^2 r_0^4 c_6}{L_0 M_r \rho_0} \sqrt{\frac{4\pi\rho}{G}}$
c_2	$\frac{1}{\nabla_{ad}}$
c_3	$\frac{4\pi r_0^3}{M_r} \bar{\rho}$
c_4	$\frac{P_0 r_0}{GM_r \rho_0}$

c_5	$\frac{1}{\beta} + \left(\frac{\partial \ln \mu}{\partial \ln P} \right)_T$
c_6	$1 - \left(\frac{\partial \ln \mu}{\partial \ln T} \right)_P + 4 \frac{1 - \beta}{\beta}$
c_7	∇_r
c_8	$\bar{\kappa}_P$
c_9	$4 - \bar{\kappa}_T$
D	$\left(\frac{A}{2} \right)^2 + \left(\frac{E}{3} \right)^3$
D	$\frac{1}{X_e^2} \cdot \frac{\varepsilon_e}{E_{X_e}}$
D^2	氘核
E	总能量 $(\sum_i \varepsilon_i a_i)$
E	一个混合气体原子电离后释放出的电子数
E	$\frac{368}{243} U^2$
E_{coul}	库伦势能
E_G	引力能
E_K	粒子的平均热能
E_N	核能
E_{n_i}	一克“ n ”种元素物质经过热核反应变为“ i ”种元素物质时所释放出的能量
E_{X_e}	一克碳热核反应产生的能量
E_ν	在 dt 时间内沿 θ 方向穿过面积元 $d\sigma$, 并在主体角 $d\omega$ 内的频率在 ν 与 $\nu + d\nu$ 之间的能量
e	电子电荷
$F(\nu)$	爱因斯坦跃迁系数(每秒发生感应复合跃迁几率)
$F_\nu(\psi)$	$\int_0^\infty \frac{u^\nu}{e^{-\psi+u} + 1} du$
f	原子的自由度

f	$\pi F_c / \pi F$
f	核反应屏蔽系数
$f(\psi)$	$\int_0^\infty \frac{X^2}{e^{-\psi} e^{X^2} + 1} dX$
$f(E)$	$\frac{2}{\pi^{1/2}} \frac{1}{(kT)^{3/2}} e^{-E/kT} E^{1/2}$
$f(y)$	$y(2y^3 - 3)(1 + y^2)^{1/2} - 3 \ln((1 + y^2)^{1/2} - y)$
$f_2(y)$	$3y^4(1 + y^2)^{1/2}$
$f(\xi)$	$\xi(2\xi^2 - 3)(1 + \xi^2)^{1/2} + 3 \sinh^{-1} \xi$
$f_{3\alpha}$	3α 反应过程的屏蔽系数
$f_{\text{O}^{16}}$	$\text{C}^{12} \rightarrow \text{O}^{16}$ 反应过程的屏蔽系数
$f_{j+1/2}$	$\frac{1}{2}(f_{j+1} + f_j)$
f_N	CNO 循环反应的屏蔽系数
f_{PP}	PP 反应的屏蔽系数
$f_{\text{O}^{16}}$	$\text{O}^{16} \rightarrow \text{Ne}^{20}$ 反应的屏蔽系数
$f_{\text{弱}}$	弱屏蔽时的屏蔽系数
$f_{\text{强}}$	强屏蔽时的屏蔽系数
G	引力常数
G	$\log T - \frac{2}{3} \log \rho - 5.25$
$G(\nu)$	爱因斯坦跃迁系数(每秒发生自发复合跃迁的几率)
G_H	$\frac{1}{\eta_H(1 - \eta_H)} + \frac{\nu_H}{E(1 + E)}$
G_{He}	$\frac{1}{(\eta_H + \eta_{\text{He}^+})(1 - \eta_H - \eta_{\text{He}^+})} + \frac{\nu_{\text{He}}}{E(1 + E)}$
G_{He^+}	$\frac{1}{\eta_{\text{He}^+}(1 - \eta_{\text{He}^+})} + \frac{\nu_{\text{He}}}{E(1 + E)}$
$G_{1j}, G_{2j}, G_{3j}, G_{4j}$	Henyey 方法中根据四个基本方程而得到的具有零值的函数

g	引力加速度
g_{ik}	束缚-自由跃迁过程的岗特因子
$\bar{g}_{ik}$	g_{ik} 的平均值
g_{kk}	自由-自由跃迁过程的岗特因子
$\bar{g}_{kk}$	g_{kk} 的平均值
g_{rs}	r 阶电离度 s 激发态的统计权重
H	氢
H^+	氢离子
H^0	中性氢原子
He	氦
He^+	一阶氦离子
He^{++}	二阶氦离子
H_P	$-\frac{dr}{d \ln P}$
h	普朗克常数
$\hbar$	$h/2\pi$
I	总辐射强度
I_ν	频率为 ν 的辐射强度
I_1	$\int_0^\infty \frac{(2\xi + \xi^2)^{1/2} (\xi + \xi^2)}{e^{\eta-\psi} + 1} d\xi$
I_2	$\int_0^\infty \frac{(2\xi + \xi^2)^{3/2}}{e^{\eta-\psi} + 1} d\xi$
J	双星系统的总角动量
j	总发射系数
j_ν	频率为 ν 的发射系数
K	浮力
K	多层球方程中的系数
K	总热导系数