

普通天体物理学

李宗伟 肖兴华 编著



高等教育出版社

普通天体物理学

李宗伟
肖兴华 编者

高等教育出版社

(京) 112号

内 容 提 要

本书是建立在大学高年级学生的数理基础上的一部普通天体物理教科书。全书系统地阐述了天体物理学的基础知识，论述了60年代以来天体物理学的新进展，有重点地介绍了某些研究领域的前沿课题。

全书共分九章，即：绪论，天体物理中的辐射过程，天体物理观测方法和天体物理量的测定，太阳物理，恒星的结构和演化，致密星，星际物质，银河系和河外星系，宇宙学。

本书可作为师范院校，综合大学物理系高年级选修课的教材，亦可供天文、天体物理专业研究生、天体物理研究人员和教师，以及有关科技人员参考。

本书责任编辑 杨祥

普通天体物理学

李宗伟 编著
肖兴华

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

高等教育出版社激光照排技术部照排

北京印刷一厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 22 插页 4 字数 570 000

1992年3月第1版 1992年3月第1次印刷

印数 0001—1 412

ISBN 7-04-003736-X/O·1103

定价 10.65元

開心明目
循序致精



喜讀宗澤興華同志
著《普通天體物理學》
王綬瑄 一九九一年

序

天体物理学是应用物理学的理论、方法和技术，研究天体的物理性质、化学组成和演化规律的学科。它是古老天文学的一个年青活跃，富于生命力的分支学科。

半个多世纪以来，突飞猛进的科学技术促使天体物理学的内容发生了巨大变革。射电技术、红外探测技术、航天和空间技术的兴起和发展，使早先仅限于光学波段的天文观测，一跃而为包括射电、红外、可见光、紫外、X射线直至 γ 射线的全波段观测，极大地扩展了人们的视野，由此而获得了一系列惊人的新发现。

浩瀚宇宙的研究向人们展现了许多崭新的，甚至是“谜”一般的课题，例如，天体活动过程中释放的无比巨大的能量；能量极高的宇宙高能粒子；每立方厘米有数亿吨质量的超密态物质；以及高达 10^{12} — 10^{13} 高斯的脉冲星磁场……，这些课题向科学提出了严峻的挑战。可以预期它们的解决必将推动物理学和其他有关学科的发展；甚至有可能成为一次新的自然科学革命的重要组成部分。

正是由于现代天体物理学与物理学之间互相渗透和交融的特殊关系，促使不少物理学工作者涉足天体物理学的研究领域。“普通天体物理学”一书的出版，将为他们提供一本有价值的参考书。全书九章几乎涉及天体物理学所有重要的研究领域。其中既有基本理论和观测处理方法的介绍；又有对各研究领域主要成果的概括和评述。

太阳、月亮、星星、银河等等天体常常被文学家引入美丽的诗篇，天文学常被人们看成是一门神秘而又富于幻想的科学。然而，当你步入这门学科的大门时，你就会发现，那些从天体物理观测和理论分析所得到的，许多看起来“神奇”、“玄妙”的不

可思议的结果，都是建立在坚实科学理论和实验技术基础之上的。我希望，当人们读完“普通天体物理学”一书后，能认识到天体物理学是一门基础扎实且结构严密的学问。

鉴于“普通天体物理学”一书所涉及的知识广泛性，可以料想到两位作者在编写这本著作时，付出了何等辛勤的劳动。如果这本书的出版，能使更多的人了解天体物理学，甚至加入天体物理学的研究队伍，共同来推动我国天体物理学的发展，我相信作者一定会感到无比欣慰！

曲钦岳

1991年6月于南京大学

前 言

天体物理学是天文学的重要分支。“天体物理”一词，现在变得相当普及，特别是1987年初发现了超新星1987A并测到了中微子；1990年4月24日哈勃空间望远镜升上了太空，知道“天体物理”和想涉足天体物理研究的人越来越多。近30年来，随着60年代天体物理的四大发现，天体物理进入了最伟大发现的鼎盛时期，其间不断揭示出一些完全崭新的，并且也越来越“奇”的现象。在建立宇宙中许多现象、天体、过程的有根据的理论和模型，并把它们纳入物理体系方面，获得了重大的成就。现代天体物理成为自然科学最前沿的领域之一。国际上近来已涌现出大量介绍天体物理的书籍。但在国内，天体物理和天文学普及不够，全面介绍天体物理基础和前沿课题的书籍几乎是空白。大学物理系高年级学生，刚跨入天体物理专业的研究生都希望尽快地了解“天体物理最近有什么成就？”“现代天体物理前沿有哪些研究课题？”他们急需既有基本理论和观测分析方法，又有对各研究领域主要成果加以概括和评述的天体物理学。本书正是为此而编写的。

该书是在我们教学所用讲义的基础上，按照高等学校理科物理学教材编审委员会天文学教材编审小组于1984年审定的大纲而全部重新改写而成的。

物理学家在研究支配我们世界的自然规律时常转向天文学和宇宙学，天体物理是现代物理学的试金石；而天文学家又依据物理学家在地面实验室中建立的理论去理解天体物理现象。我们在全书中始终贯彻天体物理和物理学之间这种根本性的相互联系。不仅将天体物理观测的繁多的现象加以描述和分类，而且在组织材料和解释时建立在基本物理基础之上。例如，告诉学生恒星世

界五光十色千姿百态，重要的是阐明为什么恒星会演化为红巨星或白矮星、中子星等。进而强调在基本粒子、原子和分子微观世界与星际物质、恒星、星系和宇宙这一宏观世界之间的深刻的联系。科学的天文学真正的美妙是寓含于“宇宙的统一性”之中。

本书定名为《普通天体物理学》，其含义为侧重介绍天体物理的基本概念和原理，也部分地、有选择地论述了某些前沿领域的最新进展；以期区别于论述某一专门课题或天体的专著。阅读本书需有物理学的“四大力学”为基础。

全书的体例按照天体物理的特性分为两大部分。前三章从总体上介绍基础原理和观测分析方法；第四章至第九章分别介绍现代天体物理的有关研究对象和领域，同时贯穿着有关物理理论。

太阳物理是发展迅速和研究深入的学科。太阳是全面运用各有关物理理论加以详细研究的天体，太阳的基本参量是天体物理的基本单位，因此自然先简述太阳物理。

20世纪天体物理最辉煌的成就之一是较全面地理解了恒星的结构和演化；现代天体物理最活跃的研究领域之一是致密天体和天体的活动过程。为此我们用两章来加以全面的论述，以便读者较快地进入该领域的前沿阵地。

星际物质的研究突飞猛进，开辟了一些全新的研究领域。星际物质与恒星的生与死，与星系的结构和演化密切相关，所以辟专章加以讨论，它具有承前启后的作用。

星系和宇宙学是前沿阵地，是最引人入胜的篇章。作为科学的宇宙学所依据的是：观测和实验的发现，物理宇宙模型的建立，以及理论和检验之间的对证。该领域的发展日新月异，我们重点介绍最基本的内容，使广阔无垠的宇宙成为人们可以理解的科学事实。

全书中每章之前都引证了著名科学家的名言，既是每章的纲要，同时又富有哲理和思辨，以求达到“画龙点睛”。同时在论述某些重要天文事件或论争时，用一定篇幅介绍了历史材料，目

的是从中引出科学的方法论和正确的思辨，历史为现在和将来服务。

顺便说明，作者的学识和兴趣对有关论题的侧重颇有影响。对超新星和超新星遗迹、中子星的论述稍详且具特色，这反映了个人的“偏爱”。

本书内容广泛，涉及天体物理各个主要领域。作者深感知识有限，力单势薄。为弥补于此，我们广泛征求天体物理同行们的意见，多方争取帮助。如果没有朋友们的支持和帮助，本书很难问世。在此我们对热心帮助我们的朋友和同志表示衷心的感谢。他们是北京天文台的李启斌、李竞、邹振隆、胡景耀诸同志，南京大学的陆谈、许敖敖、朱慈墟诸同志，高能所的李惕碚、马玉倩二同志，中国科技大学的尤峻汉、程福臻、褚耀泉、卢炬甫诸同志，给予更多帮助的自然是北京师范大学天文系的同事曹盛林、吴时敏、孙锦等同志，还有研究生李卫东同志。

我们要特别感谢的是：冯克嘉先生为本书撰写了日地关系 (§ 4.5)；王绥璋先生审阅了大纲和各章引言，提出了改进意见并热情地为本书题字；曲钦岳教授在十分繁忙的工作中为本书作序；马骥同志在异常忙碌中审阅了全部书稿，提出了许多宝贵的修改意见和建议。在此一并由衷地致谢。

由于作者学识水平有限，又加涉及面广，错误和不当之处在所难免，恳请读者提出批评指正。

作 者

一九九一年春于北京

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 宇宙概观	1
1. 太阳系	2
2. 恒星	3
3. 星际物质	4
4. 星系	5
5. 宇宙	6
§ 1.2 宇宙物质的基本规律和物质状态	7
1. 粒子和四种作用力	7
2. 微观过程和宏观规律	10
3. 辐射和电子	12
4. 核素的分布	14
5. 原子的电离	16
6. 宇宙中物质的状态	18
§ 1.3 天体物理学和物理学	26
1. 天体物理学	26
2. 天文学 (天体物理学) 方法	29
3. 天体物理学和物理学的全面渗透	33
第二章 天体物理中的辐射过程	40
§ 2.1 辐射转移理论	40
1. 描述辐射场的物理量	40
2. 发射系数、吸收系数和爱因斯坦几率系数	45
3. 辐射转移方程	49
§ 2.2 热辐射	52
1. 黑体辐射	53

2. 普朗克定律的特性	54
§ 2.3 单个带电粒子的辐射	56
1. 单个带电粒子的辐射场	56
2. 单个带电粒子的辐射功率和辐射角分布	60
§ 2.4 回旋辐射, 同步加速辐射及曲率辐射	68
1. 回旋辐射	68
2. 同步加速辐射	71
3. 曲率辐射	83
§ 2.5 逆康普顿散射	84
1. 康普顿散射	84
2. 逆康普顿散射 (康普顿辐射)	88
§ 2.6 韧致辐射	91
1. 单一速度电子的韧致辐射	92
2. 热韧致辐射	96
§ 2.7 切仑柯夫辐射	98
第三章 天体物理观测方法和天体参数的测定	101
§ 3.1 获得天体信息的渠道	101
1. 电磁辐射	101
2. 宇宙线	102
3. 中微子	102
4. 引力波	103
§ 3.2 信息的收集和观测视野的扩展	105
§ 3.3 天文望远镜和辐射探测器	111
1. 天文望远镜	111
2. 辐射探测器	113
§ 3.4 天体的光度测量	115
1. 星等	116
2. 测光系统	117
3. 色指数和热改正	119

4. 星际消光、星际红化和色余	119
§ 3.5 天体的谱分析	121
1. 天体物理光谱分析	122
2. 恒星的分类	125
3. 河外特殊天体光谱分类	129
§ 3.6 射电天文方法	131
1. 射电天文的早期发展和成就	131
2. 射电望远镜	132
3. 射电天文测量	137
§ 3.7 空间天文方法	139
1. 红外天文卫星 (IRAS) 和国际紫外探险者 (IUE)	139
2. X 射线天文和 γ 射线天文观测	141
3. 哈勃空间望远镜 (HST)	142
§ 3.8 天体的距离	146
1. 视差	146
2. 分光视差法	148
3. 威尔逊-巴普法	149
4. 星群视差法	150
5. 主星序重叠法	150
6. 变星测距	150
7. 谱线红移和哈勃定律	151
§ 3.9 恒星的大小	153
§ 3.10 天体的质量	156
1. 恒星质量的测定	156
2. 星系质量的测定	161
3. 星系团的质量	166
§ 3.11 天体的年龄和宇宙的年龄	168
1. 赫罗图法	168
2. 核纪年法	170

3. 宇宙年龄	171
第四章 太阳物理	173
§ 4.1 太阳概述	174
1. 太阳的质量和半径	174
2. 太阳常数和太阳光度	175
3. 太阳大气分层	176
4. 太阳作为一颗恒星的基本参量	176
§ 4.2 太阳的结构: 内部和光球	177
1. 太阳的内部	179
2. 太阳中微子问题	185
3. 光球	189
4. 米粒组织和振荡	193
§ 4.3 等离子体物理和磁流体力学基本原理	194
1. 等离子体的特征	195
2. 粒子的轨道理论	197
3. 磁流体力学基础	199
§ 4.4 太阳活动	204
1. 太阳活动和磁场	204
2. 活动区	205
3. 太阳黑子	207
4. 耀斑	211
§ 4.5 日地关系	222
1. 日地关系中应考虑的太阳有关因素	223
2. 太阳活动与地球暴的关系	225
3. 太阳活动与气象的相关	233
4. 太阳活动和气候变化的探讨	235
5. 地球轨道变化与太阳常数	240
第五章 恒星的结构和演化	243
§ 5.1 恒星的观测特性	244

§ 5.2	星团和赫罗图	246
1.	星团	246
2.	星协	247
3.	赫罗图	248
4.	星团的赫罗图	251
§ 5.3	恒星演化概述	255
1.	恒星演化进程概貌	255
2.	恒星的最后归宿	257
§ 5.4	恒星演化的时标	258
1.	自由下落时标	259
2.	开尔文-亥姆霍兹 (K-H) 时标	260
3.	爱因斯坦时标	261
§ 5.5	恒星形成和早期演化	262
1.	物质凝聚和恒星形成	262
2.	动力学方程线性化和金斯判据	263
3.	旋转的影响	266
4.	孤立星云的坍缩	267
5.	磁场的影响	269
6.	赫罗图中的林忠四郎线	270
§ 5.6	恒星结构的基本方程	273
§ 5.7	恒星内部物理状态	277
1.	辐射传能	277
2.	对流传能	280
3.	物态方程	283
4.	不透明度	286
5.	能源	290
§ 5.8	各种质量恒星的演化	298
1.	理论 $H-R$ 图	299
2.	主序星的特性	300

3. 低质量星的演化	302
4. 大质量星的演化	307
§ 5.9 超新星	313
1. 观测特性	313
2. II型超新星	327
3. I型超新星	332
4. 核合成	338
第六章 致密星	340
§ 6.1 致密星的形成	340
§ 6.2 白矮星	342
1. 白矮星理论简史	342
2. 多方球	343
3. 钱德拉塞卡质量极限	347
4. 理论与观测的比较	349
§ 6.3 中子星	351
1. 历史	351
2. 物态方程和中子星模型	353
§ 6.4 脉冲星	357
1. 发现和证认为中子星	357
2. 观测特性	358
3. 色散量	362
4. 脉冲星磁偶极模型	364
5. 脉冲星的辐射机制	366
§ 6.5 黑洞	373
1. 爱因斯坦引力论	373
2. 黑洞	379
3. 黑洞热力学	380
4. 黑洞可发出辐射	381
§ 6.6 密近双星	383

1. 洛希瓣和密近双星分类	383
2. X 射线源的双星模型	386
3. X 射线双星的起源	387
§ 6.7 X 射线源和 X 射线爆	389
1. 研究简况	389
2. X 射线脉冲双星	392
3. X 射线爆	398
(1) I 型 X 射线爆	399
(2) II 型 X 射线爆	401
§ 6.8 γ 射线天文学和 γ 射线爆	403
1. γ 射线天文学	403
2. γ 射线爆	407
§ 6.9 吸积	413
1. 致密天体的吸积盘	415
2. 吸积盘基本理论	416
第七章 星际物质	427
§ 7.1 星际尘埃和星际气体的发现	428
§ 7.2 分子云和恒星形成	432
1. 分子云的特征	432
2. 太阳周围的分子云	433
3. 暗分子云	434
4. 分子云和年青恒星在银河系内的分布	436
§ 7.3 气体星云在各波段的表现形式	439
1. 光学观测	439
2. 射电观测	444
3. 红外观测	446
4. 紫外、 X 射线和 γ 射线观测	447
§ 7.4 星际气体的物理过程	448
1. 辐射转移	449

2. 电离和复合	450
3. 能量损失机制	454
§ 7.5 星际尘埃	458
1. 尘埃的光学特性	458
2. 尘埃的物理特性	461
§ 7.6 星际气体动力学过程	468
1. 星际空间中的激波	468
2. 星云的运动	473
(1) 光致电离星云	473
(2) 星风对星际气体的影响	476
(3) 超新星爆发对星际介质的影响 (超新星遗迹)	478
§ 7.7 恒星和星际物质的相互作用	483
1. 恒星的死亡	483
2. 恒星的诞生	485
第八章 银河系和河外星系	492
§ 8.1 银河系	492
1. 概貌和基本参量	492
2. 恒星计数	494
3. 恒星的运动	498
4. 银河系自转	500
5. 星族	508
6. 旋臂结构	509
7. 银核和银心	513
§ 8.2 星系	518
1. 沙普利-柯蒂斯论争	518
2. 星系的分类	522
3. 星系类型的统计分析	529
4. 光度函数	531
5. 星系的表面亮度	533