

# 天体物理学概念



[美] 马丁·哈威特 著

科学出版社

# 天体物理学概念

[美] 马丁·哈威特 著

万籁 赵君亮 朱圣源 译

科学出版社

1981

## 内 容 简 介

本书着重介绍天体物理学的物理概念、基础理论和方法。全书分十一章，前面几章概述了现代天体物理学的范围及有关天体的大小和质量等一些基本问题。第四至第七章介绍了物理学基础知识。第八至第十章论述了有关恒星的结构和演化、宇宙气体动力学及宇宙的大尺度特性等问题。最后一章讨论了宇宙中的生命。

本书有一定的深度和广度，适合于天文工作者以及对天文学有兴趣的物理工作者阅读，也可供其他有关科技人员参考。

Martin Harwit

Astrophysical Concepts

John Wiley, 1973

天 体 物 理 学 概 念

[美] 马丁·哈威特 著

万籁 赵君亮 朱圣源 译

责任编辑 方开文

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

1981年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1981年9月第一次印刷 印张：20 1/2

印数：0001—3,240 字数：466,000

统一书号：13031·1584

本社书号：2176·13—3

定 价：3.15 元

## 译者的话

本书是作者马丁·哈威特根据他在科内尔大学天文系和物理系对毕业班学生及研究生多年讲课的讲稿编写而成。与当前同类书籍相比，这是一本颇适宜于自学的读物。本书着重介绍天体物理学的物理概念、基础理论和方法，有一定的深度和广度。我们把它译成中文，以供国内从事这方面工作的同志参考。

全书分十一章。第一章是天体物理学入门。第二、三两章论述了有关天体的距离、大小和质量等一些基本问题。第四至第七章对物理学基础知识作了广泛的、由浅入深的介绍，以便为阅读下面几章打下基础。这些内容对于从事天体物理工作的读者，在阅读有关的专著或论文时都是大有裨益的。第八至第十章进一步对第一章内提到过的那些有关恒星的结构和演化、宇宙气体动力学及宇宙的大尺度特性等问题，作了深入的、定量的论述。最后一章讨论了宇宙中的生命。

总之，对于在天文学和物理学两门学科中只熟悉一门的读者来说，本书的编写方法是很适合的，通过它可以得到一系列天体物理学的概念，为进一步的研究准备了必要的基础。

本书第二、三章由万籁翻译，第一、七、八、九、十章由赵君亮翻译，第四、五、六、十一章及附录由朱圣源翻译。在翻译过程中，译者对原书中的错误及某些过时的数据作了改正，并加了译者注。由于译者水平有限，错误及疏漏之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

## 序 言

我写这本书的主要目的，在于以足够的深度对广泛的天体物理学课题向读者提供一般的介绍，从而使读者能对这门学科的全貌有一个定量的了解。本书概要地论述各种宇宙事件，但未加以详细的介绍，旨在提供一系列天体物理学的轮廓。鉴于天体物理学中的许多问题目前还不太明确，不少观点尚在不断变化之中，我认为采取这样一条途径是比较恰当的。

本书内容取自我在科内尔大学为物理学和天文学毕业班学生及初级研究生讲课的讲稿，这门教程决定了本书的写作深度。

为了方便那些精通物理学但对天文学名词却不熟悉的读者，书中添加了一个附录 A，它扼要地介绍了一些最基本的天文学概念。应该先阅读这个附录，然后再接触正文。

前面几章概括地叙述了现代天体物理学所涉及的范围，同时论述了有关天体的大小和质量的一些基本问题。然而读者马上就会发现，再深入下去需要有广泛的物理学基础。第四章至第七章就是以天文学所特有的现象为例，对有关这方面的知识由浅入深地作了介绍。第八章至第十章则对第一章中已初步提到过的那些内容作了进一步的阐述，指出我们怎样才能对有关恒星的结构和演化、宇宙气体动力学以及宇宙的大尺度特性等问题取得定量的深入的了解。最后一章讨论了宇宙中的生命。

通贯全书，我特别强调的是天体物理学的概念，这意味着

象小行星、恒星、超新星或者类星体这样一些天体没有列出专门章节一一介绍，而是在讨论有关的物理原理时把它们穿插于全书之中。这样就突出了许多天文现象的共同特征，但也提供了某些特殊天体的部分资料。例如，第五章、第六章、第八章、附录 A 以及其他一些地方，就从各个不同的侧面对中子星和类星体进行了讨论。

我们所述及的仅仅是几个传统天文学课题的大致轮廓，比如辐射转移理论、恒星大气以及多层气体球等，这是因为完整的介绍必然要用到大量的纯粹的数学推导。尽管如此，这些课题的主要物理概念都已穿插在正文之中了；它们通常只是一些一般性的叙述，不再作专门的说明。另外，在适当的地方我还援引了对这些课题有更详细说明的其他一些资料来源。

参考书目是为那些愿意在某一个方面进行更深入研究的读者提供的。我仅仅举出了这样一些作者，他们对某一领域卓有贡献，因而他们的观点可以使读者对有关课题取得更深入的了解。尽管其中所引用的某些文章只是普及性的，然而文笔却相当严谨。

涉及到天体物理学主要内容的一部书，必然要以现有的许多优秀的专题论文和评述性文章作为前导。要恰当地感谢原作者和那些对我的写作观点有强烈影响的天体物理学家是不可能的。我同样要向科内尔大学的同事以及看过这本书（它从一系列非正式的教学讲稿演变而来）的几届学生表示感谢，他们为本书提供了许多改进的意见。最后，我还要对为本书提供了插图的 B. L. 贝特彻表示谢意。

马丁·哈威特

# 目 录

<b>第一章 研究天体物理学的一条途径</b> .....	(1)
1.1 获得天文学信息的渠道 .....	(4)
1.2 X 射线天文学: 一门新兴学科的发展概况.....	(7)
1.3 物理学定律的合理建立 .....	(12)
1.4 恒星的形成 .....	(14)
1.5 恒星的演化 .....	(20)
1.6 恒星和太阳系中化学元素的丰富度 .....	(31)
1.7 太阳系的起源 .....	(37)
1.8 星系和星系团的形成与演化 .....	(51)
1.9 有关生命的若干问题 .....	(60)
1.10 观测不到的天体.....	(63)
<b>第二章 宇宙距离尺度</b> .....	(70)
2.1 太阳系的大小 .....	(70)
2.2 三角视差 .....	(70)
2.3 分光视差 .....	(71)
2.4 移动星团方法 .....	(71)
2.5 威尔逊及巴普的方法 .....	(72)
2.6 主星序重叠法 .....	(74)
2.7 天琴 RR 型变星的亮度 .....	(75)
2.8 造父变星的亮度 .....	(75)
2.9 新星的亮度和 HII 区 .....	(76)
2.10 距离-红移关系 .....	(76)
2.11 西利格法则及宇宙学中的计数.....	(79)

<b>第三章 天体的动力学及其质量</b>	(85)
3.1 万有引力	(85)
3.2 椭圆及圆锥曲线	(89)
3.3 中心力	(90)
3.4 引力二体问题	(91)
3.5 开普勒定律	(93)
3.6 引力常数的确定	(98)
3.7 质量的概念	(99)
3.8 惯性参考系——等效原理	(102)
3.9 引力红移及时间膨胀	(103)
3.10 时间的测量	(105)
3.11 脉冲星时间的利用	(107)
3.12 银河系自转	(108)
3.13 在平方反比律场中天体的散射	(110)
3.14 恒星阻力	(112)
3.15 维里定理	(115)
3.16 抵制潮汐分裂的稳定性问题	(118)
<b>第四章 随机过程</b>	(125)
4.1 随机事件	(125)
4.2 随机游动	(126)
4.3 分布函数、几率和平均值	(131)
4.4 随机定向杆的投影长度	(132)
4.5 分子运动	(135)
4.6 理想气体定律	(138)
4.7 辐射动力学	(141)
4.8 等温分布	(143)
4.9 大气密度	(143)
4.10 大气中粒子的能量分布	(145)



4.11	相空间 .....	(148)
4.12	恒星的角直径 .....	(151)
4.13	炽热天体内部及外部的光谱 .....	(153)
4.14	玻耳兹曼方程及刘维定理 .....	(160)
4.15	费米-狄拉克统计法 .....	(163)
4.16	萨哈方程 .....	(167)
4.17	平均值 .....	(169)
4.18	热力学第一定律 .....	(170)
4.19	等温过程和绝热过程 .....	(173)
4.20	凝聚的形成及星际介质的稳定性 .....	(174)
4.21	电离气体和恒星系集 .....	(177)
<b>第五章 光子和快速粒子 .....</b>		<b>(185)</b>
5.1	相对性原理 .....	(185)
5.2	相对论术语 .....	(187)
5.3	相对运动 .....	(190)
5.4	四维矢量 .....	(196)
5.5	光行差 .....	(198)
5.6	动量、质量和能量 .....	(200)
5.7	多普勒效应 .....	(203)
5.8	微粒的坡印廷-罗伯逊阻力 .....	(204)
5.9	在宇宙微波背景辐射场中的运动 .....	(206)
5.10	高能粒子 .....	(209)
5.11	高能碰撞 .....	(211)
5.12	超光速粒子 .....	(213)
5.13	强引力场 .....	(216)
<b>第六章 空间电磁过程 .....</b>		<b>(221)</b>
6.1	库仑定律及电介质位移 .....	(221)
6.2	宇宙磁场 .....	(224)

6.3	欧姆定律和耗散作用	(226)
6.4	粒子的磁加速	(226)
6.5	安培定律以及宇宙电流和磁场间的关系	(228)
6.6	磁镜、磁瓶和宇宙线粒子	(228)
6.7	麦克斯韦方程	(232)
6.8	波动方程	(233)
6.9	相速和群速	(236)
6.10	能密度、压力和坡印廷矢量	(237)
6.11	在稀薄电离介质中波的传播	(239)
6.12	法拉第旋转	(243)
6.13	慢运动电荷的光发射	(246)
6.14	无束缚电荷的光散射	(253)
6.15	星际微粒消光	(257)
6.16	等离子体辐射的吸收和发射	(259)
6.17	热射电源的辐射	(265)
6.18	同步加速辐射	(267)
6.19	同步加速辐射谱	(270)
6.20	康普顿效应和逆康普顿效应	(274)
6.21	宇宙尺度的同步加速发射和逆康普顿 效应	(279)
6.22	切仑可夫效应	(281)
<b>第七章 天体物理学中的量子过程</b>		(287)
7.1	原子系统对辐射的吸收和发射	(287)
7.2	原子系统的量子化	(289)
7.3	原子氢和类氢原子的光谱	(293)
7.4	电离氢的光谱	(303)
7.5	氢分子	(306)
7.6	光谱线中所包含的信息	(310)

7.7	选择定则·····	(313)
7.8	吸收线和发射线的轮廓·····	(316)
7.9	量子力学的跃迁几率·····	(318)
7.10	受激发射、相干过程及黑体辐射·····	(327)
7.11	受激发射和宇宙微波激射器·····	(331)
7.12	恒星的不透明度·····	(334)
7.13	恒星大气的化学组成——辐射转移问题·····	(339)
<b>第八章</b>	<b>恒星</b> ·····	<b>(347)</b>
8.1	观测·····	(347)
8.2	恒星能量的来源·····	(351)
8.3	恒星模型所必须满足的要求·····	(355)
8.4	理论的数学方程表达式·····	(357)
8.5	弛豫时间·····	(359)
8.6	物态方程·····	(363)
8.7	光度·····	(366)
8.8	恒星内部的不透明度·····	(368)
8.9	对流转移·····	(374)
8.10	核反应的速率·····	(377)
8.11	基本粒子及其相互作用·····	(381)
8.12	恒星内的产能过程·····	(384)
8.13	赫罗图和恒星演化·····	(395)
8.14	从某些恒星的表面化学组成所观测到的、 有关恒星演化的证据·····	(398)
8.15	直接观测恒星内部核过程的可能性·····	(404)
8.16	初始温度为 $10^{10}\text{K}$ 的爆发天体中元素合成 的可能性·····	(407)
8.17	致密星·····	(410)
8.18	白矮星·····	(411)

8.19	中子星和黑洞 .....	(417)
8.20	恒星的脉动和自转 .....	(423)
<b>第九章</b>	<b>宇宙气体和尘埃 .....</b>	<b>(431)</b>
9.1	观测.....	(431)
9.2	斯特雷姆格伦球.....	(441)
9.3	冲击阵面与电离阵面.....	(448)
9.4	分子和微粒的形成.....	(456)
9.5	原始太阳星云中的凝聚过程.....	(460)
9.6	来自银河源的红外发射.....	(462)
9.7	恒星的形成.....	(466)
9.8	星际微粒的取向问题.....	(470)
9.9	宇宙磁场的起源.....	(479)
9.10	星际介质中的宇宙线粒子 .....	(484)
9.11	X 射线星系和类星体 .....	(491)
<b>第十章</b>	<b>宇宙的结构 .....</b>	<b>(499)</b>
10.1	有关宇宙的若干问题 .....	(499)
10.2	宇宙的各向同性和均匀性 .....	(500)
10.3	宇宙学原理 .....	(504)
10.4	物质的创生 .....	(506)
10.5	宇宙的均匀各向同性模型 .....	(508)
10.6	测量宇宙的几何特性 .....	(514)
10.7	宇宙的拓扑学 .....	(524)
10.8	宇宙尺度上的动力学 .....	(525)
10.9	几种简单的宇宙模型 .....	(526)
10.10	奥伯斯佯谬.....	(532)
10.11	宇宙的地平线.....	(535)
10.12	具有物质和反物质的宇宙模型.....	(539)
10.13	星系的形成.....	(543)

10.14	自然界的常数是随时间变化的吗? .....	(553)
10.15	时间箭头.....	(559)
<b>第十一章</b>	<b>宇宙中的生命 .....</b>	<b>(570)</b>
11.1	引言 .....	(570)
11.2	生物系统的热力学 .....	(570)
11.3	自然界和实验室中的有机分子 .....	(574)
11.4	地球上的生命起源 .....	(577)
11.5	通讯和空间旅行 .....	(579)
<b>结束语</b>	.....	<b>(584)</b>
<b>附录 A</b>	<b>天文学名词 .....</b>	<b>(585)</b>
A.1	导言 .....	(585)
A.2	太阳 .....	(586)
A.3	太阳系 .....	(588)
A.4	恒星系统和星系 .....	(593)
A.5	恒星的亮度 .....	(598)
A.6	恒星的分类 .....	(604)
A.7	恒星的分布和运动速度 .....	(615)
A.8	脉冲星、射电星和 X 射线源 .....	(617)
A.9	类星射电源和类星体 .....	(621)
A.10	光子和宇宙线粒子.....	(623)
<b>附录 B</b>	<b>天体物理常数 .....</b>	<b>(624)</b>
B.1	物理常数 .....	(624)
B.2	天文常数 .....	(624)
<b>参考书目</b>	.....	<b>(627)</b>

## 第一章 研究天体物理学的一条途径

从某种意义上说，我们每一个人都曾处于恒星之内；从某种意义上说，我们每一个人又都曾处于恒星际广袤的虚无空间之中；而且，如果宇宙确曾有开端的话，那么我们每一个人都都在那儿停留过。

我们体内的每一个分子所含的物质都曾一度经受过恒星中心巨大的温度和压力的剧烈作用，我们红血细胞中的铁就是在那儿起源的。我们所吸入的氧，人体组织中的碳和氮，以及骨骼中的钙，它们也是在恒星中心通过较小原子的聚变而形成的。

地球上的矿物中包含了铀、钚、铅以及许多别的重原子，它们必然是在一次超新星爆发中生成的，这种爆炸就是一颗恒星的自行毁灭，它把一个太阳那么大的质量以极其巨大的速度抛入宇宙空间之中。实际上，地球上以及人体内的大多数物质都必定经历过这样一种灾变式的事件。

我们发现元素锂、铍和硼在地球上的含量甚少，它们看来是通过星际空间的宇宙线轰击而生成的。在那个时代，我们今天所生活的地球曾经分布得极度稀薄，以致一克土壤所占有的体积就有我们整个行星那么大。

为了说明地球上所发现的重氢同位素——氘，我们也许不得不回溯到意味着整个宇宙诞生的那一次爆炸。孩子玩的气球内的氦，有一部分也就是在那个时候形成的。

所有这一切我们是怎么知道的呢？而对这种知识，我们又能相信到什么程度呢？

写这本书的目的就是要回答诸如此类的问题，并为作出天体物理学的判断提供一种方法。

我们现正开始在宇宙间作一次漫长而又有趣的旅行。许多东西要学习，许多东西要丢弃，又有许多东西要加以修正。我们有卓绝的理论，但理论只是掌握真理的向导，它们并不是真理本身。因此，我们就必须不断地对理论加以修正，才能保证引导我们在正确的方向上前进。

在通览本书的过程中，我们会发现要在实质和表象之间作出选择是十分困难的，就象去发明新理论时的情况一样。我们一定要明白，作出这种选择也许还为时过早，天体物理学中的真实性往往是短命的；而且一定要知道——虽然这是令人苦恼的，我们也许总有一天不得不正视现实，即我们的理论所认识的只不过是一些皮毛，而不是比较深入的真正有推动力的因素。

因此，我们可以恰到好处地避开天体物理“事实”所带来的某种先入之见。我们应该把目光放远一些，而且应该紧紧抓住可能对我们认识的将来演变起一定作用的那些物理概念。我们可以按下面的路子进行推理。

最近几十年来天体物理学的进展是带有革命性的。我们放弃了那些过去看来是十分可靠的理论，而代之以新的理论，而且常常发现甚至连替代的理论都难以找到。在这场革命中，唯一不变的就是许多天体物理学的概念。它们没有发生本质上的变化，而且一直在为我们演变中的理论不断地提供资料来源。

在这些概念中就有中子星，从提出到发现，其间经过了35年；还有黑洞，在提出这一概念后过了30年，天文学家们才开始着手寻找这类天体。因此，我们的精力最好放在对这些概念进行更深入的探究上。

在天体物理学中，我们常常会感到为难的是：我们应该围绕着个别的天体——行星、恒星、脉冲星和星系——来构思呢，还是应该根据不同的天体物理过程所共有的物理学原理来划分课题。

我们既然强调的是概念，那么取第二条途径就比较合适。但是这也会带来一些问题，有关各类天体的许多资料就会遍及全书，因而只能通过索引来加以收集，这就会导致叙述上的某种不平衡。

这种不平衡由于数学处理方式的不同而变得更为严重，因为任何天体物理图象，要是我们不能给它们的尺度以某种数值，那就是不完整的。所以，在本书中，我们的宗旨是要去取得不同现象各特征量的大致量级。在某些场合下，这样做不会带来任何数学上的困难。但在另一些问题上，我们则不得不先有一些相当复杂的数学预备知识，然后才能找到那甚至极为粗糙的答案。第十章中对宇宙曲率的估算，就是这种比较复杂的过程的一个例子。

说明了这些困难——看来它们部分是由现代天体物理学的性质所决定的——之后，让我们来研究一下使用本书的最有效的方法。

对于那些原来缺乏天文基础知识的人，附录 A 可以为之提供一个良好的起点。它扼要地描述了我们将要研究的天体，并介绍了天文学上所用的符号，这种符号法将在全书中予以应用，而其他章节中一般就不再给它下定义了。至于那些以前学习过天文学的人，他们就可以直接从本章开始，这一章所叙述的是目前天体物理学中正在热烈进行着的探索工作，也就是我们所要寻求答案的那些问题。第二、第三章表明，尽管宇宙的某些粗略尺度可以通过在概念上比较简单的那些方法来加以测定，然而，为了掌握宇宙的能量以及宇宙演化的性



质,就需要对物理学有一个比较深入的了解。因此,在中间的第四章到第七章就叙述了我们所需要的物理学工具。接下来,我们就集中利用这些工具去努力论述本文开始时就提到过的化学元素合成理论、恒星的形成和演化、星际空间所发生的种种过程、宇宙的演化,以及生命起源的天体物理背景。

这是一个动人的、富有挑战性的大胆尝试;但是,我们还有很长的一段路要走。

让我们开始吧!

## 1.1 获得天文学信息的渠道

让我们设想有那么一颗行星,在它的上面居住着一批没有视觉的文明生物。某一天,有一位发明家发明了一种能够感受可见光的仪器,并且发现这种仪器的用途非常广泛,特别是对于天文学很有用处。

人类是能够看见光线的,因而我们同那些还正在寻找能探测可见辐射方法的任何文明生物相比,在天文学上就大为领先了一步。然后,我们再想象有一种比我们更为先进的文明生物,他们不仅有能力探测到可见光,而且可以探测到所有其他的电磁辐射;并且还拥有能感受宇宙线、中微子和引力波的望远镜和探测器。显然,这种文明生物的天文学知识可以远比我们所掌握的为多。

现在已经知道存在着四条完全互不相干的渠道,遥远宇宙中的信息就是通过这些渠道传到我们这儿来的。

(a) 电磁辐射:  $\gamma$  射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线,以及射电波。

(b) 宇宙线粒子: 这包括了高能粒子、质子、较重的核以及(不稳定的)中子和介子。某些宇宙线粒子是由反物质构成的。