

宇宙物理学

〔日〕林忠四郎 早川幸男 主编

科学出版社

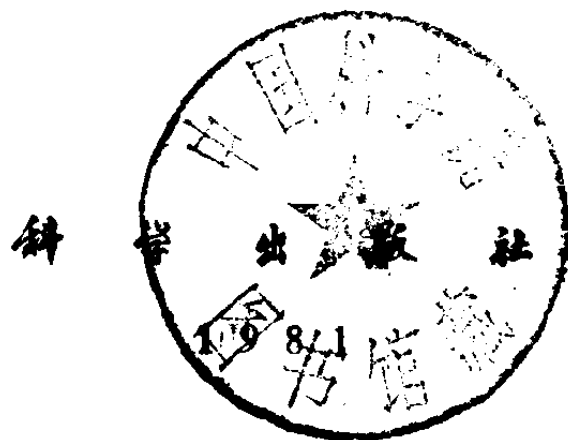
宇宙物理学

〔日〕林忠四郎 早川幸男 主编

师 华 译

冯克嘉 李启斌 校

7003/23



812859

内 容 简 介

本书是一本介绍“宇宙物理学”的专著。全书以与原子核、基本粒子、广义相对论等关系最密切的天体现象为重点,比较系统地、全面地介绍了恒星演化、宇宙学、宇宙线和元素起源等理论问题。

本书可供天体物理学工作者和天体物理专业师生及研究生使用,也可供原子核、基本粒子、宇宙线、等离子物理、地球物理、地球化学等领域的工作者参考。

林忠四郎 早川幸男 編集

宇 宙 物 理 学

岩波講座《現代物理学の基礎》11

岩波書店, 第2版, 1978年

宇 宙 物 理 学

〔日〕林忠四郎 早川幸男 主编

师 华 译

冯克嘉 李启斌 校

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8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1981年8月第一次印刷 印张: 20 7/8

印数: 0001—3,000 字数: 473,000

统一书号: 13031·1629

本社书号: 2230·13—5

定价: 3.20 元

译 者 序

本书是根据日本岩波书店出版的岩波讲座《现代物理学基础》第十一卷《宇宙物理学》第二版译出的。原书由林忠四郎、早川幸男主编,编写分工如下:第一篇林忠四郎,第二篇杉本大一郎(第三至第六章)、佐藤文隆(第七章),第三篇佐藤文隆,第四篇早川幸男,第五篇伊藤谦哉、蓬茨灵运。本书的特点是作者试图采用微观过程可以由宏观现象反映出来这一新的观点来论述宇宙物理学,因而认为寻求微观的基本粒子反应过程与宏观的天体演化过程之间的关系是解释宇宙现象的基础。基于此作者选择了与原子核、基本粒子、广义相对论等关系最密切的天体现象作为重点,比较系统地、全面地介绍了恒星演化、宇宙学、宇宙线和元素起源等方面的最新观测资料 and 理论研究的进展。本书也反映了日本学者在这一学科领域中研究问题的基本观点和方法,具有一定的特色。为了促进中日科学文化交流,将该书译出,供有关科研和教学人员参考。

本书在翻译过程中,得到了中国科学院北京天文台李启斌同志和北京师范大学天文系冯克嘉先生的具体指导和帮助,他们在百忙中详细地校对了全部译文;此外,还得到了其他有关同志的热情鼓励和帮助,在此一并向他们表示衷心感谢。

译文虽经多次校核,但是,由于译者水平所限,错误和不当之处在所难免,请读者批评指正。

第一版 序 言

宇宙物理学这个名词目前尚未在国际上得到公认，大家所惯用的还是近代天文学和天体物理学，但是，把这两者结合起来，并特别强调它与现代物理学的联系，这样一个学科称为宇宙物理学也许更好些，而且用宇宙物理学这个术语，就不会只限于解释各种天体的静态结构，还可以包含对天体演化过程予以统一解释的涵义。

十五世纪以来，天文学是同力学、光学等经典物理学共同发展起来的。事实上，经典物理学中某些基本定律的发现和验证，有许多就是来自于对天体现象的观测。进入二十世纪后，出现了量子论和相对论，使原子-分子、原子核、基本粒子等近代物理学领域发展起来了，天体物理学的发展同这些学科有着密切的联系。然而，天体物理学并不局限于单纯地将近代物理学应用于天体现象的消极意义，而且通过新天体现象的发现和解释，还可以促进现代物理学的发展。在天体上存在着地面实验室不易实现的超高温、超高密、高能、强磁场、低密度等极限状态，通过对这些天体现象的观测和理论研究，可望发现宏观和微观的新物理定律，乃至形成新的自然观。

现在已知的天体尽管种类繁多，但归纳起来，可大致分为太阳系、恒星、星际气体、星系和整个宇宙等层次。相应于不同的层次，建立了天文学和天体物理学的各个分支。最近，观测和理论研究都在突飞猛进，很难把各个领域的现状归纳成一本书。所以本书只能将与原子核、基本粒子、广义相对论等

关系最密切的天体现象选为重点。我们认为,寻求微观的基本粒子反应过程和宏观的天体演化过程之间的相互关系,乃是解释宇宙现象的基础。例如,在恒星演化中,恒星中心进行核反应所必需的温度和压力是由恒星的宏观引力决定的;反之,由于核反应的进行,恒星内部的化学成分发生变化,密度和引力分布等宏观量也随之发生巨大变化。

基于上述宗旨,我们选择了恒星演化、宇宙学、宇宙线和元素起源等四个论题。第一篇是绪论,首先简单地介绍天体各个层次的观测知识和理论研究的现状,以了解宇宙的概貌;然后介绍理解这些宇宙现象所必须具备的知识,即宏观的和微观的物理定律之间的基本关系,以及处于各种温度、密度的热动平衡条件下的物质微观状态。

第二篇叙述恒星一生的演化问题。在演化论中,对微观物理过程和宏观现象的联系的理解比在宇宙物理学其他领域中更清楚,而且有了较好的数学表述。当然,这些数学式基本上是非线性的,在很多情况下,还不容易对演化特征作直观的说明。最近,虽然利用电子计算机作过数值计算,但令人担心的是数字的汪洋大海是否会掩盖了物理本质。所以,本书力图避免繁琐的数学运算,尽可能用物理概念直观地说明演化的本质。

第三篇从恒星开始叙述宇宙中的各种天体。现代宇宙学的对象是称为“膨胀宇宙”的总星系。这是一个广度约 10^{10} 光年、年龄约 10^{10} 年、质量为银河系的 10^{10} 倍的物理系统。自古以来,宇宙学的对象,一方面是指“无所不包”的哲学上的宇宙,另一方面是指每个时代天文观测所能达到的有限的最大层次。因此,历史上宇宙学的对象随人类的认识而变迁,为了了解现代宇宙学,也必须懂得它的发展的历史过程,所以先从“宇宙论的发展”谈起;然后讨论以广义相对论为基础的膨胀

宇宙的空间论和动力学,以及膨胀宇宙中的物态变化和星系起源问题;最后提及马赫原理和宇宙的原始状态等宇宙论中的特殊问题。

第四篇叙述关于偏离热动平衡态的粒子和辐射以及它们所携带的天体的信息,及其在天体的力学行为与化学演化中所起的作用。这些非热粒子就是宇宙线,是由能量较高的原子核(包括质子)和电子组成的。与宇宙线关系密切的是高能辐射的X射线和 γ 射线以及非热射电辐射,研究这些粒子和辐射的关系的学科称为高能天体物理学。第四篇虽应以高能天体物理为正式标题,但再三考虑后,还是采用大家所习惯的宇宙线作为标题。

第五篇系统地论述前四篇中间或提到过的元素起源问题。从而在某种程度上就提出了膨胀宇宙、恒星和星系演化、宇宙线起源等现象的相互关系及其所处的地位问题。首先介绍作为基础的热核反应理论,然后解释恒星演化中从氢燃烧开始到快中子俘获反应结束的一系列反应过程,并将这些过程中所形成的元素丰富度与宇宙元素平均丰富度加以比较。最后叙述非热核反应引起的轻元素的形成和星系化学演化等问题。

关于元素的起源,还有很多未知的东西,而且随着观测精度的提高,还会出现一些难以解释的问题。因此,其中与宇宙物理学各个领域相联系的问题,仍是今后需要进一步开拓的领域。希望读者读完第五篇以后,再从第一篇开始把全卷重读一遍,那时,也许会对某些问题作出新的评价,进而增加研究“宇宙物理学”的兴趣。

林忠四郎 早川幸男

1973年春

第二版 序 言

本书初版问世已经五年多了。考虑到宇宙物理学的巨大进展,五年是很长的时间,因此有必要作较大修改;所幸的是,有关变化较大的星际物质和星系等,本书没有单列一专章,然而,有关X射线和 γ 射线的第十六章则必须加以改写。

本书的基本观点是微观过程可以由宏观现象反映出来,这一论点本质上没有改变。某些部分在初版中只描述了一个梗概,在第二版中已采用新的观测资料加以充实。为了尽可能地保持初版结构进行修订,对新进展不可能深入介绍,只是通过X射线和 γ 射线着重阐明宇宙中存在着远远超越地面实验室的极限状态。

银河系内的很多X射线源是有简并子星的密近双星。随着密近双星演化研究的进展,逐渐了解到它在恒星演化中的作用。为了介绍这方面的情况,增加了§ 5.12。

在球状星团和活动星系的核心区存在着X射线源,有人认为其中也许伴有质量黑洞;而探索X射线和 γ 射线爆发源,也必须涉及黑洞理论。因此,在§ 10.5 (c)等处增加了有关黑洞的内容。

此外,我们尽可能把增加和修订的内容限制在较小篇幅,即使如此,也增加了将近四十页。

林忠四郎 早川幸男

1978年夏

目 录

译者序.....	i
第一版序言.....	iii
第二版序言.....	vi

第一篇 绪 论

第一章 天体的层次.....	1
§1.1 层次的分类	1
§1.2 太阳系	5
a) 行星 (6) b) 化学组成和年代测定 (7) c) 太阳系的起源 (8)	
§1.3 恒星	11
a) 距离 (11) b) 光谱 (12) c) 元素的含量 (14)	
d) 光度和颜色 (17) e) 半径 (20) f) 质量 (20)	
g) 赫罗图 (21) h) 赫罗图的解释 (26) i) 新星和超新星 (27) j) 脉冲星和中子星 (29)	
§1.4 星际气体	31
a) 中性氢(HI)区 (33) b) 电离氢(HII)区 (37)	
c) HII区的射电波 (39) d) 分子的观测 (40) e) 固体微粒 (41) f) 磁场 (42) g) HI区的能密度 (43)	
h) 星际气体的加热和冷却 (44)	
§1.5 星系	49
a) 银河系 (49) b) 银核 (52) c) 旋臂的形成理论 (54)	
d) 一般的星系 (55) e) 哈勃定律 (59) f) 射电星系 (61) g) 类星体 (63) h) 塞佛特(Seyfert)星系 (67)	
§1.6 宇宙	68

- a) 物质和辐射的分布 (68) b) 相对论的宇宙膨胀论 (72) c) 膨胀宇宙的线元 (73) d) 膨胀力学 (75)
- e) 零压模型 (76) f) 红移 (80) g) 红移-星等的关系 (83) h) 温度变化 (85)

第二章 宇宙的基本定律和物质状态	87
§2.1 微观过程和宏观规律	87
§2.2 统计热平衡	102
§2.3 辐射和电子	109
a) 辐射 (109) b) 电子 (110)	
§2.4 核素的分布	114
a) 完全平衡分布 (114) b) 仅由核反应达到的平衡 (118) c) 偏离核平衡 (120)	
§2.5 原子的电离	122
a) 温度电离 (122) b) 压致电离 (125)	
§2.6 相互作用的影响	126
a) 超高温和超高密 (126) b) 核力 (127) c) 结晶化 (130)	

第二篇 恒 星 演 化

第三章 恒星演化理论的基础	132
§3.1 恒星演化理论的建立	132
§3.2 恒星演化的近代描述	134
§3.3 恒星结构的基本方程	139
§3.4 物态方程	142
§3.5 光的吸收系数	145
§3.6 对流传热	150
§3.7 热核反应	153
§3.8 中微子引起的能量损失	156
第四章 化学组成均匀的恒星	166
§4.1 时间尺度	166

§4.2	积分定理	169
	a) 维里定理 (169) b) 能量守恒定律 (170)	
§4.3	力学平衡	171
§4.4	均质恒星的结构	176
§4.5	恒星的光度	181
§4.6	解的唯一性问题	184
§4.7	动态不稳定性	186
第五章 从恒星诞生到超新星爆发		189
§5.1	恒星的形成	189
	a) 星际气体云的演化 (189) b) 原始星的急剧收缩 (193)	
§5.2	林氏阶段	197
	a) 表面对流层 (197) b) 向主星序收缩 (199)	
§5.3	主序星和星团的年龄	201
§5.4	太阳中微子	207
§5.5	化学组成的不均匀的发展	208
	a) 对流造成的混合 (209) b) 子午环流 (209)	
§5.6	向红巨星演化	212
	a) 中心区氢的耗尽和壳燃烧的发生 (216) b) 等温中心核 (216) c) 中心核收缩和外层膨胀 (216) d) 引力收缩中心核 (219) e) 电子简并中心核 (220)	
§5.7	氦闪	222
§5.8	氦燃烧阶段	225
	a) 球状星团的恒星 (225) b) 银河星团中的恒星 (227)	
§5.9	碳-氧中心核及其以后的演化	231
	a) 忽略中微子损失的情况 (233) b) 有中微子损失的中等质量的恒星 (234) c) 有中微子损失的重恒星 (237) d) 对流外层向中心核侵入 (238)	
§5.10	中微子损失是否存在	243
§5.11	超新星爆发	246

a) 碳爆发型超新星 (247) b) 铁的光致分解型超新星 (250)	
§5.12 密近双星的演化	255
a) 洛希等势面 (255) b) 恒星演化和双星之间的物质交流 (258) c) 各种看法的讨论 (261)	
第六章 恒星演化的最后形态	271
§6.1 白矮星的冷却	271
§6.2 零温高密物质	274
§6.3 广义相对论性的恒星的引力平衡	278
§6.4 中子星	281
a) 零温星和中子星的极限质量 (281) b) 关于中子星问题 (286)	
§6.5 超大质量恒星	288
a) 超大质量恒星的稳定性 (288) b) 超大质量恒星的收缩 (292)	
第七章 恒星的引力坍缩	296
§7.1 黑洞	296
§7.2 球对称引力坍缩	298
§7.3 轴对称旋转引力场	301
a) Weyl 解 (302) b) 旋转引力场 (303)	
§7.4 一般引力坍缩的最终状态	306
§7.5 引力波释放	307
§7.6 黑洞发射的能量	310
a) 黑洞的结合能 (310) b) 黑洞的能量和质量公式 (311) c) 黑洞的热力学和“蒸发” (312)	

第三篇 宇 宙 学

第八章 宇宙论的发展	314
§8.1 无限空间与岛宇宙	314
a) 无限的宇宙与无限的空间 (314) b) 牛顿的绝对	

空间 (314) c) 岛宇宙与天体起源论 (315) d) 相对论以前的宇宙论 (316)	
§8.2 膨胀宇宙与演化宇宙	318
a) 爱因斯坦相对论和惯性系 (318) b) 膨胀宇宙的发现 (320) c) 膨胀宇宙理论 (322) d) 演化宇宙 (323) e) 微观物理规律与宇宙结构 (324)	
第九章 宇宙的结构	325
§9.1 膨胀宇宙的模型	325
a) 宇宙原理 (325) b) 宇宙时空的度规 (326) c) 宇宙模型的构成 (329)	
§9.2 常曲率空间	329
§9.3 广义相对论的宇宙论	331
a) 爱因斯坦引力场方程 (331) b) 爱因斯坦的静止宇宙 (333) c) 没有物质的宇宙 (334) d) Friedmann 宇宙 (335) e) Lemaitre 宇宙 (335)	
§9.4 膨胀宇宙的其它模型	337
a) 牛顿引力宇宙论 (338) b) Milne 宇宙论 (340) c) 稳恒宇宙论 (342) d) Lyttleton-Bondi 的宇宙论 (342) e) Alfvén-Klein 的宇宙论 (343)	
§9.5 膨胀宇宙的观测	343
a) 膨胀宇宙模型的参量 (343) b) 红移与宇宙视界 (345) c) 红移与星系亮度的关系 (349) d) 视亮度与星系数目的关系 (350) e) 视角直径 (352) f) 宇宙年龄 (353) g) 观测的现状 (353)	
§9.6 均匀各向同性模型的推广	356
a) 空间对称性和 Killing 矢量 (356) b) 最大限度对称空间与 de Sitter 宇宙 (359) c) 三维均匀非各向同性空间 (362) d) 普遍的膨胀方程——Raychaudhuri 方程 (364)	
第十章 宇宙的演化	367

§10.1	演化与稳恒	367
§10.2	热宇宙的初期与氦的形成	368
	a) 辐射能占优势的状态 (369) b) 辐射和物质的膨胀 (370) c) 中微子黑体辐射 (371) d) 质子与中子的比例 (372) e) 氦元素的形成 (373) f) 元素合成与宇宙模型的选择 (376)	
§10.3	热宇宙中期的物质与辐射	378
	a) 从辐射优势到物质优势 (378) b) 辐射与物质的相互作用 (378) c) 宇宙物质的中性原子化 (379) d) 辐射和物质的退耦与宇宙黑体辐射 (380)	
§10.4	起伏的成长与星系的形成	381
	a) 起伏 (382) b) 膨胀宇宙中起伏的成长 (382) c) 密度起伏的成长 (384) d) 粘滞性、导热率和起伏的标度 (386) e) 从气体云到星系 (388)	
§10.5	充满膨胀宇宙的物质和辐射	389
	a) 银河系物质与星系物质 (389) b) 银河系外的背景辐射 (390) c) 宇宙线与宇宙黑体辐射 (391) d) 中微子海 (392) e) 各种质量的黑洞 (393)	
第十一章 宇宙学的基础		395
§11.1	马赫原理	395
	a) 惯性的起源 (395) b) 反马赫度规 (397) c) 马赫原理的推广和狄拉克的建议 (399)	
§11.2	宇宙的层次结构	400
	a) 从星系团到超宇宙 (400) b) 层次性结构和宇宙黑体辐射的各向异性 (400) c) 相对于惯性系统的旋转 (402)	
§11.3	宇宙的原始状态	402
	a) 光的俘获面的存在和时空奇异性 (402) b) 时空的量子起伏 (403) c) 混合宇宙 (404) d) 基本粒子的时代 (405)	

§11.4	引力理论及其验证	406
a)	相对论的引力现象 (406)	
b)	各种引力理论 (408)	
c)	后牛顿近似与四个实验 (409)	

第四篇 宇 宙 线

第十二章	宇宙线的各种基本过程	411
§12.1	非热状态	411
a)	带电粒子的电离能的损失(411)	
b)	热韧致辐射(413)	
§12.2	带电粒子在磁场中的运动	416
a)	刘维定律 (416)	
b)	绝热不变量 (419)	
c)	粒子加速 (421)	
d)	不同粒子加速效率的差异 (427)	
§12.3	粒子扩散	429
a)	无规则运动 (429)	
b)	Fokker-Planck 方程 (431)	
第十三章	宇宙线起源模型	434
§13.1	各种成分的能密度	434
§13.2	太阳成分	437
§13.3	银河成分	438
§13.4	银河系外成分	440
第十四章	原子核成分	441
§14.1	化学成分的观测值	441
§14.2	原子核嬗变	445
§14.3	宇宙线的传播	447
§14.4	原始组成与宇宙组成的比较	452
§14.5	太阳发生的宇宙线	455
§14.6	能量分布	457
§14.7	各向异性	463
第十五章	电子成分	472
§15.1	同步加速辐射	472
§15.2	逆康普顿效应	475
§15.3	银河系射电波与星际空间的电子成分	477

§15.4	银河系内电子的传播	483
§15.5	超新星遗迹发射的射电波	487
§15.6	河外射电源	494
第十六章	X 射线和 γ 射线	496
§16.1	γ 射线 (≥ 100 MeV)	496
	a) γ 射线的发生机制 (496) b) γ 射线强度的方向分布 (497) c) 星系际成分 (500) d) γ 射线源 (502)	
§16.2	γ 射线和 X 射线的吸收	505
§16.3	X 射线源的分布	507
§16.4	伴随超新星的 X 射线	510
§16.5	X 射线双星	514
§16.6	高温等离子体发射的 X 射线	520
§16.7	新星型 X 射线源	527
§16.8	X 射线、 γ 射线爆	529
§16.9	河外 X 射线源	535
§16.10	河外的延展成分	539
§16.11	软 X 射线的延展成分	543
第十七章	高能成分的各种效应	548
§17.1	高能成分的发生源	548
	a) 恒星在引力收缩过程中加速 (548) b) 主序星 (549)	
	c) 收缩着的恒星 (550) d) 密近双星 (554) e) 星系核 (554)	
§17.2	星际气体加热和轻元素起源	555
	a) 宇宙线引起的星际气体电离 (555) b) 轻元素的起源 (556) c) X 射线引起的电离 (557) d) HII 区 (558) e) 宇宙线的压强 (559)	
§17.3	星际气体的加热	560
	a) X 射线的吸收 (560) b) 宇宙线引起的电离 (561)	

第五篇 元素的起源

第十八章	宇宙元素的形成.....	563
§18.1	元素形成理论	563
§18.2	星内合成理论	565
第十九章	恒星能源——热核反应.....	570
§19.1	热核反应理论	570
	a) 非共振情形 (572) b) 共振情形 (575) c) 反应率 随温度的变化 (577) d) 光反应 (578) e) 产能率 (578)	
§19.2	恒星内部的热核反应	579
	a) 氘反应 (580) b) pp 链 (581) c) CNO 循环 (584) d) 氢反应 (588) e) 碳、氧、氦燃烧反 应 (593)	
第二十章	重元素的合成过程.....	597
§20.1	α 过程和 ϵ 过程以及热暴式的碳燃烧	597
	a) Si 的光分解 (597) b) α 过程的元素 (599) c) 产能率 (602) d) 原子核的热动平衡过程(ϵ 过程) (603) e) 热暴式的碳燃烧 (604)	
§20.2	s 过程	607
	a) 中子源 (607) b) 中子俘获截面 (609) c) s 过 程的元素 (611) d) s 过程的 $\langle\sigma\rangle n$ (612)	
§20.3	r 过程	615
	a) 开始发生 r 过程的恒星演化阶段 (616) b) 中子过 剩核的结合能 (617) c) r 过程元素的路径 (618) d) r 过程核的含量 (619) e) p 过程 (621)	
第二十一章	其他问题.....	622
§21.1	轻元素和氘的起源	622
	a) Li, Be 和 B 的起源 (623) b) 氘的起源 (628) c) 早型特殊星的组成 (630)	