



PPU

北京大学物理学丛书
*The Series of Advanced Physics
of Peking University*

热大爆炸宇宙学

俞允强 著



北京大学出版社 PEKING UNIVERSITY PRESS

北京大学物理学丛书

热大爆炸宇宙学

俞允强 著

北京大学出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

热大爆炸宇宙学/俞允强著. —北京:北京大学出版社,2001.4

ISBN 7-301-04921-8

I. 热… II. 俞… III. “大爆炸”宇宙学 IV. P159.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第17255号

书 名: 热大爆炸宇宙学

著作责任者: 俞允强 著

责任编辑: 周月梅 顾卫宇

标准书号: ISBN 7-301-04921-8/O·464

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑部 62752032

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

印 刷 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

850×1168 32开本 6.625印张 172千字

2001年4月第1版 2001年4月第1次印刷

定 价: 14.00元

《北京大学物理学丛书》 编委会名单

主 任：高崇寿

副 主 任：(按姓氏笔画排,下同):

刘寄星 秦旦华 聂玉昕

阎守胜 黄 涛

编 委：邹英华 邹振隆 宋菲君 吴崇试

林纯镇 俞允强 夏建白 曾谨言

韩汝珊 解思深 瞿 定

常务编委：周月梅

内 容 简 介

本书清晰、翔实地介绍了宇宙学领域迄今为止取得的理论成果,其中包括对宇宙学所依赖的理论基础的阐明.宇宙大爆炸模型作为一个取得很多成功的理论设想,本书对此作了集中的探讨,包括模型所描绘的宇宙早期、宇宙演变的历史、3K微波背景辐射所给予理论可靠性的支持等,对模型所涉及的宇宙早期图像,如元素起源、核合成问题、暗物质问题、正反物质不对称问题,均作了仔细分析.最后对大爆炸宇宙学模型的成功和存在的问题作了总结,指出了宇宙学领域可能发展的契机和宇宙学模型有待继续改进之处.

本书叙述精确,论证确凿,行文周密而涵括丰富,可以作为物理学、天文学、宇宙学科研工作者和高等院校物理系师生获得宇宙学领域最新全面知识的读物.

前 言

物理学是自然科学的基础,是探讨物质结构和运动基本规律的前沿学科.几十年来,在生产技术发展的要求和推动下,人们对物理现象和物理学规律的探索研究不断取得新的突破.物理学的各分支学科有着突飞猛进的发展,丰富了人们对物质世界物理运动基本规律的认识和掌握,促进了许多和物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的进步.物理学的发展是许多新兴学科、交叉学科和新技术学科产生、成长和发展的基础和先导.

为适应现代化建设的需要,为推动国内物理学的研究、提高物理教学水平,我们决定推出《北京大学物理学丛书》,请在物理学前沿进行科学研究和教学工作的著名物理学家和教授对现代物理学各分支领域的前沿发展做系统、全面的介绍,为广大物理学工作者和物理系的学生进一步开展物理学各分支领域的探索研究和学习,开展与物理学紧密相关的交叉学科和技术学科的研究和学习提供研究参考书、教学参考书和教材.

本丛书分两个层次.第一个层次是物理系本科生的基础课教材,这一教材系列,将在几十年来几代教师,特别是在北京大学教师的教学实践和教学经验积累的基础上,力求深入浅出、删繁就简,以适于全国大多数院校的物理系使用.它既吸收以往经典的物理教材的精华,尽可

能系统地、完整地、准确地讲解有关的物理学基本知识、基本概念、基本规律、基本方法；同时又注入科技发展的新观点和方法，介绍物理学的现代发展，使学生不仅能掌握物理学的基础知识，还能了解本学科的前沿课题和研究动向，提高学生的科学素质。第二个层次是研究生教材、研究生教学参考书和专题学术著作。这一系列将集中于一些发展迅速、已有开拓性进展、国际上活跃的学科方向和专题，介绍该学科方向的基本内容，力求充分反映该学科方向国内外前沿最新进展和研究成果。学术专著首先着眼于物理学的各分支学科，然后再扩展到与物理学紧密相关的交叉学科。

愿这套丛书的出版既能使国内著名物理学家和教授有机会将他们的累累硕果奉献给广大读者，又能对物理的教学和科学研究起到促进和推动作用。

《北京大学物理学丛书》编辑委员会

1997年3月

Preface

Physics is the foundation of natural sciences, a leading discipline of studying structures of matter and basic laws of motion. For several decades, driving by the demands of developing technology, the breakthrough in the studies of physical phenomenon and the laws of physics never end. During this period, all branches of Physics grew very fast and our knowledge of the basic laws governing the motion of the physical world was highly enriched. The growing of physics accelerated the progress of many physics related areas and technologies. The development of physics provided grounds and guidance for the birth and the growth of those new branches of physics, related areas and new technologies.

In order to catch up the main stream of the modernization and to give an impetus to scientific research and to improve teaching of physics in China. We decided to publish "*The Series of Advanced Physics of Peking University*". We invited those distinguished physicists and professors who worked in the frontier of physics to give series introductions to all branches of modern physics and recent developments in these fields. This series, as a consequence, provides textbooks and references for physicists and physics students in their studies of all branches of physics, related areas and technologies.

This series is divided into two sub-series of different levels, the first sub-series includes the textbooks of undergraduate

physics written by experienced teachers in Peking University in past decades. These textbooks were written concisely with deep insights and easier expressions, which adopt essences of physics textbook classics, explain fundamental concepts, laws and methods of physics in a systematic and rigorous way. In addition, these textbooks properly introduced the new approaches and the latest developments of physics for educational purposes. This sub-series is suitable for teaching of undergraduate physics for most universities and institutes in China. The second sub-series includes graduate textbook, references and academic writings. This sub-series focuses on the latest developments and accomplishments in the active subjects of relevant research with international interests and introductions to those of fast developing research fields. The topics of academic writings mainly cover all branches of physics, but it will be generalized to closely related areas.

We wish the publication of this series could provide an opportunity for leading physicists and physics professors in China to show their fruitful accomplishments to general audience and to give an impetus to teaching and research in physics.

Editorial board of

“The Series of Advanced Physics of Peking University”

March 1997

序

90年代初,我曾应国家教委的物理教材编写指导组之约,撰写过一本“大爆炸宇宙学”。记得在教学和科研之余写了一整年,是在1992年春天完的稿。宇宙学是一门很年轻的学科,不断有新进展出现。当时我把有重要性的最新进展都写进去了。

稿件交给出版社后,不久就看到了清样。这很使我为做成了一件有益的事而高兴。可是这件事此后就石沉大海了。询问后被告知:书店的预定数太少,不能开印。就这样一拖三年多。1995年夏天,在经过不应需要的交涉后,出版社才勉强准备开印1000册(后来实际上印了1600册)。出版后因发行渠道不通畅,常有认识或不认识的朋友给我来电话,询问此书何处有售。再过不算太久,书就售缺了。于是想读的人仍找不到这书,想满足读者需要的我无可奈何。这时我很为白花了力气而沮丧,但是没有勇气再交涉了。我不想去求出版社做它很不愿做的事。

2000年春天,赵凯华老师建议我修订一下重新出版。我意识到仍有不少人需要这样的书,而且它经过8年也确实需要修订了,所以下决心做这件事。在把旧书看一遍后,我发现它已很不让我自己满意了。一方面是这8年宇宙学进展很多,有的还很重大。另一方面是我当初过于重视公式的来源和推导性的解释,不太适合于读者阅读理解。于是我明白,需要的不是增添一些新内容,而是得完全重写过。这意味着又要花一年左右的时间,但这是我乐意做的事。

宇宙学是一门典型的基础性学科。研究它的目的是满足好奇心。人们总想对大自然有更多一点的了解和更深一点的理解。就像人人想知道物质的最小基元是什么一样,也想知道最大的宇宙是

什么样子的.人人都应该知道,例如化学元素是原子核决定的,原子核内有质子和中子,质子及中子是夸克组成的等.其实人人也都知道,宇宙可看成星系组成的气体,这气体中还有温度为3 K的辐射场,最早的化学元素是在宇宙年龄为3分钟时出现的等.但是实际上,宇宙常识的普及远不如微观知识的普及.后者早已进入中学教育,而对前者,连学物理或天文的大学生都知之甚少.作为一个宇宙学专业工作者,我觉得有责任来改变这种状况.

就这本小书的性质而言,它是算不上一本通俗读物的.我是为具有一些大学物理知识而想了解宇宙的读者写的.我对自己提的要求是:(一)尽量全面一些,把被研究过的宇宙学问题^①都写进去;(二)写得深入一些,使读者不像在听故事,而能用自己的物理知识理解它.(三)写得客观一些,有的结果已很肯定,有的很初步甚至是猜测性的,不能误导^②读者.此外我心目中还有一个动机:希望通过此书吸引更多的年轻人对宇宙学感兴趣.我国的宇宙学研究队伍太小了,平均水平也低.事情远不该是这样的.因此我也想用这本书为愿意进入宇宙学研究的读者做入门的导引.我写下这些想法,是要请读者给我反馈:效果与愿望是否能一致.

最后我愿向北京大学出版社表示敬意.副总编周月梅和书记王明舟都对我说过,他们的方针是用畅销书赢得的经济效益来“养”不可能大量畅销的科技书.这确实不是短视的出版者肯做和敢做的事.他们是在为我国的科学事业做着一件好事.

俞允强

2000年12月于北京大学

① 实际上除宇宙创生问题外,其他大问题都讨论到了.

② 若对宇宙的观测结果或理论想法采取“见风即雨”的态度,极易引申出误导性的结论.在我看来,轻易叫人相信,或轻易提出“挑战”都属于误导.

目 录

| | |
|---------------------------|--------|
| 引言 | (1) |
| 第一章 宇宙的面貌 | (4) |
| 一、宇宙级距离的测量 | (4) |
| 二、层次性的结构 | (9) |
| 三、宇宙学原理 | (12) |
| 四、宇宙的膨胀 | (14) |
| 第二章 标准宇宙模型 | (19) |
| 一、牛顿引力定律的失效 | (19) |
| 二、引力与时空的弯曲 | (21) |
| 三、均匀和各向同性的时空 | (24) |
| 四、膨胀的动力学 | (27) |
| 五、实物为主的宇宙 | (29) |
| 六、有限或无限 | (33) |
| 七、宇宙的年龄 | (34) |
| 八、红移与距离的关系 | (37) |
| 第三章 含宇宙常数的模型 | (40) |
| 一、宇宙常数的影响 | (40) |
| 二、平坦性的判据 | (43) |
| 三、真空能密度的测定 | (44) |
| 四、再论宇宙年龄 | (47) |
| 五、宇宙模型的小结 | (49) |
| 第四章 宇宙的早期 | (51) |
| 一、大爆炸的概念 | (51) |
| 二、辐射为主的早期 | (54) |

| | |
|------------------------------------|--------------|
| 三、热平衡的高温气体 | (57) |
| 四、早期膨胀的动力学 | (59) |
| 五、宇宙演化简史 | (61) |
| 六、粒子的退耦 | (62) |
| 七、宇宙的视界 | (64) |
| 第五章 微波背景辐射 | (68) |
| 一、背景光子的形成 | (68) |
| 二、观测性质 | (70) |
| 三、微波背景辐射的发现 | (72) |
| 四、黑体型的辐射谱 | (74) |
| 五、银河系的绝对运动 | (77) |
| 六、原初扰动的痕迹 | (78) |
| 第六章 原初的核合成 | (81) |
| 一、最初的原子核合成过程 | (81) |
| 二、影响产额的两个因素 | (85) |
| 三、 ${}^4\text{He}$ 原初丰度的实测推断 | (88) |
| 四、中微子的种数问题 | (90) |
| 五、其他轻核的原初丰度 | (92) |
| 六、理论的全面检验 | (95) |
| 七、重子物质的密度 | (97) |
| 第七章 物质与反物质的不对称 | (99) |
| 一、有没有反物质天体 | (99) |
| 二、正反物质不对称疑难 | (101) |
| 三、重子数守恒是严格的规律吗? | (103) |
| 四、粒子与反粒子对称吗? | (105) |
| 五、大统一与重子数的产生 | (107) |
| 六、理论的现状 | (110) |
| 第八章 甚早期的暴胀 | (113) |
| 一、标量场的自作用 | (113) |

| | |
|---------------------------|-------|
| 二、真空相变 | (115) |
| 三、暴胀的产生 | (118) |
| 四、均匀性疑难 | (121) |
| 五、结构起源疑难 | (123) |
| 六、准平坦性疑难 | (124) |
| 七、暴胀的启示及其产生机制 | (126) |
| 八、支持暴胀的证据 | (128) |
| 第九章 宇宙常数与真空能 | (130) |
| 一、问题的历史 | (130) |
| 二、真空有能量吗? | (131) |
| 三、真空产生的引力 | (133) |
| 四、问题的困境 | (135) |
| 五、理论上解困的失败 | (137) |
| 六、困境的启示 | (138) |
| 第十章 暗物质问题 | (141) |
| 一、星系的暗晕 | (141) |
| 二、星系团内的暗物质 | (143) |
| 三、宇宙密度的局域测定 | (144) |
| 四、密度作为宇宙学参量 | (146) |
| 五、非重子暗物质的概念 | (148) |
| 六、热和冷的暗物质 | (150) |
| 七、问题的小结 | (152) |
| 第十一章 结构的形成 | (154) |
| 一、自引力的不稳定性 | (154) |
| 二、膨胀宇宙中的小扰动 | (157) |
| 三、重子宇宙模型的困难 | (160) |
| 四、结构形成作为初值问题 | (163) |
| 五、热暗物质为主的模型 | (166) |
| 六、冷暗物质为主的模型 | (168) |

| | |
|-----------------------|-------|
| 七、近年的进展和展望 | (170) |
| 附录 I 广义相对论提纲 | (173) |
| 附录 II 粒子物理大意 | (181) |
| 附录 III 自然单位制 | (190) |
| 附录 IV 天文学和宇宙学常量 | (194) |

引 言

宇宙指的是物质世界的一切.它是人类所面对的最巨大的客体.正是这一特点使它历来吸引着各种人的兴趣.诗人对它抒发情怀,哲人借它阐发哲理.可是近代的宇宙学家却是把它当作一个普通的物理对象来研究的.我们图的是对它有一个具体而真实的了解.

初一想,地球上的物质已十分纷杂,这包罗一切的巨大对象如何研究?我们自然知道,地球上的一切在宇宙中只是细微末节.为研究宇宙,须放眼于地球之外.抬头看天,见到的是满天星斗,人们都叫它们为星星.实际上只有那些离我们较近的光点才是恒星.远的光点不是恒星,而是很大的恒星集团,叫星系.这些肉眼能见的和望远镜中才能见的,还有连用望远镜也不能见的天体,才是宇宙物质.

宇宙学的目标不是研究这些天体本身,这是它与天文学或天体物理学的区别.宇宙学是借助各种天体带来的信息,以研究宇宙的整体状况和行为.这目标决定了它的视野十分宽广.宇宙中可能被观测部分的大小超过百亿光年.整个宇宙或许无限,也或许有限.即使它为有限,其大小比百亿光年肯定要大很多很多.空间上的广袤是宇宙的特点之一,也是研究它的困难根源之一.我们不仅必须能观测非常远处的天体,而且还须有能力从观测中析取可靠而定量的信息.人类起步研究宇宙并不晚,大约是在 20 世纪初.它的蓬勃发展却仅是近 30 年的事.后来靠的首先是天文观测上的进步.

宇宙不仅在空间横向地展开它的复杂性,还在时间纵深上展开了复杂性.由于光的传播需要时间,所以对一亿光年远的天体,

看到的是它在约一亿年前的面貌,而不是今天的面貌.这是一个很普通的道理,但也是很深刻的道理.这样看来,宇宙在空间上的复杂性和时间上的复杂性只是同一件事的两个侧面.天文学家越往远处观测,他们所看到的是越年轻的宇宙.

人们从 20 世纪 20 年代起就知道了宇宙不是不变的,而是在膨胀.自然界所有看来像亘古不变的东西实际上都有缓慢的变化.这种变化叫演化.生物物种在演化,恒星和星系在演化,宇宙也不例外地在演化.从前远古的宇宙是什么样子的?它如何一步步地演化成了今天的模样?这是宇宙学想弄清楚的主要内容.

现在知道,我们的宇宙已演化了 150 亿年左右.有趣的是,过去的宇宙完全不是今天宇宙的缩影.它们之间有着质的差别.年轻的宇宙中曾没有恒星,也没有星系.它曾只是一片炽热的气体.更令人惊讶的是,在更年轻的宇宙中没有碳、氢、氧、氮,等等,连化学元素这样基本的物质形态也是在宇宙演化中产生的.这些结果其实都非常可信,但又非常难以令人置信.宇宙学的多彩和魅力正在这种地方.

当我们按已知的物理规律推断出一段段遥远的宇宙历史,怎么证明它是真实而可信的?宇宙学必须对此作出回答.实际上这才是要研究的核心.今天的宇宙学是作为物理学的一个分支而发展的.因此回答的办法只有一个,那就是提供直接或间接的事实证据.宇宙演化史感兴趣的至少是十亿年前的事.要找出证据可真谈何容易!所以,今天的宇宙学能理直气壮、振振有词地谈论宇宙最初几万年的事(3K 微波背景辐射),甚至最初 1 小时的事(原初核合成),实在是魅力无穷,令人在心灵上感受到震撼.

在 3K 背景辐射发现以来的 30 余年中,热大爆炸宇宙理论已赢得了无可争议的成功.这是事实,但是成功的事实不要掩盖其弱点.瑕不掩瑜,瑜也不掩瑕.总体说来,宇宙学的发展还处于它的未成年期.尚不能回答的问题远比已有答案的问题多.已能回答的问题中,答案的牢靠程度也各各不同.这才是今天宇宙学的真实面