北京大学物理学丛书

# 物 理 宇 宙 学 讲 义

俞允强　编著

北 京 大 学 出 版 社
北　　京

需要全本请访问 www.ertongbook.com

**图书在版编目(CIP)数据**

**物理宇宙学讲义/俞允强编著. —北京：北京大学出版社，**2002.11

**(北京大学物理学丛书)**

ISBN 7-301-05360-6

Ⅰ. **物…** Ⅱ. **俞…** Ⅲ. **天体物理学** Ⅳ. P14

**中国版本图书馆** CIP **数据核字**(2002)**第** 067731 **号**

**书　　名**：**物理宇宙学讲义**

**著作责任者**：**俞允强　编著**

**责 任 编 辑**：**周月梅**

**标 准 书 号**：ISBN 7-301-05360-6/O・0520

**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

**电　　话**：**发行部** 62754140　**编辑部** 62752021

**电 子 信 箱**：zpup@pup.pku.edu.cn

**印　刷　者**：

**发　行　者**：**北京大学出版社**

**经　销　者**：**新华书店**

850×1168　32 **开本**　8.875 **印张**　230 **千字**

2002 **年** 11 **月第** 1 **版**　2002 **年** 11 **月第** 1 **次印刷**

**定　　价**：15.00 **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

本书是国内第一本为大学生开设宇宙学课程的教材，是作者在多年讲授本课的基础上总结整理而成的. 内容分五大部分：(1) 恒星和星系；(2) 宇宙学基础(宇宙学的基本事实和宇宙膨胀的动力学)；(3) 宇宙的早期(早期宇宙概况、光子背景辐射、大爆炸核合成)；(4) 粒子宇宙学初步(正反物质的不对称、甚早期宇宙的暴胀)；(5) 结构的形成(物质结团的理论基础、结构形成的模型研究). 本书也可作为研究生教材.

# 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前导.

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

需要全本请访问 www.ertongbook.com

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

# 序　言

在上世纪最后二十多年里，以天文观测和物理规律为基础的宇宙学理论已可靠地确立了. 它被学术界认为是 20 世纪最重要的科学成就之一. 宇宙学是一门典型的基础学科，至今人们还完全说不出它的应用前景. 可是宇宙作为自然界的最大客体，真实地了解它的面貌和演化过程却是人们普遍的精神需求. 因此，在这样的学科发展成熟后，把它从专家的研究成果转化为人类共享的知识财富是必定要走的一步.

出于教学改革的考虑，北京大学物理系的学术委员会在 1999 年决定为大学生开设宇宙学课程. 次年，校教务处又把它纳入了面对全校学生的通选课. 在我们国内，这样做很可能是第一例(没认真调查过)，而其实这是大势所趋. 因此我非常支持这样的尝试，并很高兴接受这个任务.

此前我一直在为物理和天文专业的研究生讲授宇宙学. 每次开课都有许多本校和外单位的人来选修或旁听. 这也反映了想了解宇宙学的人很多，普及它很有必要. 可是真要把它作为基础教学来开设这门课，如何取材对我依然是颇费思考的一个问题.

我在过去的教学中已意识到，关于宇宙人们听到过的说法很多，而其中有不少是误导性的判断. 例如很多人以为大爆炸理论断言今天的宇宙是在 150 亿年前从一点炸开的，因而肯定宇宙的有限性. 同时还有不少人认为，宇宙的有限性与辩证唯物论哲学是冲突的. 其实这些都是误解. 大爆炸宇宙理论已为实践所证实，这是事实. 可是它并没有肯定宇宙的有限性. 从宇宙学看，它的有限或无限既不是哲学能回答的问题，也不是哲学应该回答的问题. 这些误解使我认识到：即使是普及地讲解宇宙学知识，把结论的来龙

去脉交代清楚是必须的任务. 否则没有办法把肯定的结果与误导性的说法区分开,听者也无法判断你讲的结论的可信程度.

宇宙学作为物理学的一个分支,它的理论框架是在假设和推理的基础上建立起来的. 可是只有被实践证实了的部分,才会被肯定下来. 因此要原原本本地讲授这理论本身及其可信程度,涉及的物理和天文基础都很宽. 其中有不少并不是大学生们事先具备的. 教师须在课程中为同学提供有关的准备. 可是过多的基础性准备又会使课程显得臃肿和喧宾夺主. 考虑到这一点,我感到取材很难. 实际上我每年教学内容的取舍都有变化,但是我坚持一个不变的原则: 尽量系统地把理论的来龙去脉交代清楚,同时只做尽量少的铺垫.

关于宇宙学本身的取材却相对比较明确. Friedmann 的宇宙动力学和 Gamow 的大爆炸理论无疑应当是课程的主要部分. 我在讲解上既注意了理论推导,也注意了对结果的实验验证程度的讨论. 我深信这部分内容已相对地可以固定下来. 值得进一步考虑的是教学中如何对待一些尚在进展中的宇宙学课题. 这里指的是甚早期演化、宇宙的创生和宇宙结构的形成. 这些部分至今未能成熟,很大程度上是由于相关的物理基础尚不够清楚,因此这是宇宙学中非常有生命力的部分. 它在今后的进展必然会为物理学带来新的思想,甚至新的突破. 基于心中有这样的评价,我的做法是尽可能扼要地把它们吸收到教学中来,但是不能把试探性的理论与成熟的理论相混淆. 这里又有教学忌误导的问题.

我目前是在面对全校的学生开设物理宇宙学的课程. 这是一门每周讲授 3 学时的课程. 本书就是以历年的讲稿为基础编写而成的,因此我把它定名为"物理宇宙学讲义". 这几年的实践表明,它对理科学生,包括本科生和研究生都是基本合适的. 至于对文科学生,因为本课程事先假定学生已具备大学普通物理的有关知识,所以对他们不是很合适. 长远地讲,文理科的宇宙学课程还是需要分开开设的. 这不仅是由于基础知识上的差别,也是由于思想方法

上的差别.

此外我还有一点想法.我国因受“文化大革命”之害,今天研究宇宙学的队伍很单薄,甚至较全面地了解宇宙学的人数也太少.这使我既感到普及宇宙学教学之迫切,也感到要这样做的困难.在这样的处境下,我认为在大学教学中,把宇宙学知识吸收到普通物理的教学中来是更现实的事.例如说,安排 10 至 20 学时的讲授对学生是大体合适的,也是教师较容易适应的.我很希望这本书也能对此起到推动的作用.

最后我感谢北京大学教务处、物理系学术委员会和北大出版社对宇宙学教学和对出版本书所作过的支持.

俞允强

2002 年 8 月于北京大学

# 引　言

什么是宇宙?自古至今这都是诗人爱遐想、哲理家爱沉思的问题.其实宇宙也是物质性的客体.人们要认识它的办法只有靠观测来获取信息,以及用物理规律来做推理.从自然科学的眼光看,物理地研究它是获得正确认识的惟一途径.这正是本课程在宇宙学之前加上"物理"二字的含义.

宇宙的概念指自然界一切物质的总体,它是最大的物理对象了.由于宇宙空间之广袤、演化历史之久长以及物理条件之极端,使得要研究它很难.因此尽管自古以来的人们对宇宙谈论得很多,可是用物理方法研究宇宙的历史却不到一百年.

Einstein 在 1915 年提出了引力的一般理论,即广义相对论.在 1918 年,他把宇宙作为广义相对论的应用对象而尝试地研究了它.其实当时的条件还相当不成熟.我们知道,要物理地研究任何客体,总需要对它有一定的感性认识.可是当时的天文学家却对于银河系是宇宙的全部或一部分都还不清楚.作为试探,Einstein 猜测地提出了两个简化假设:(一)宇宙可被看成充满全空间的均匀介质;(二)宇宙在整体上是静态的.在这样的基础上,他为宇宙建立了第一个物理模型.现今人们称它为 Einstein 的静态宇宙模型.

在对未知客体做物理研究时,先提出猜想性的假设不仅是正常手段,而且可以说是探索过程的灵魂.可是物理归根到底是一门实验科学.只有当观测表明这种假设及(或)其推论与客观事实相一致,人们才会把它当正确的物理理论来接受.Einstein 宇宙模型的遭遇正好相反.20 世纪 20 年代初,即在模型提出后不久,天文学家开始发现了宇宙在膨胀的迹象.这意味着 Einstein 的静态模

型并不是真实宇宙的写照. 于是它被抛弃了. 无论如何,他为宇宙的物理研究迈出了第一步.

1923 年,天文学家 Slipher 等人观测了十来个旋涡星云的光谱,并第一次发现其中大部分有光频的红移. 若把这红移理解为 Doppler 效应的后果,则这事实表明光源(星云)在向远离我们的方向后退. 同一时期里,另一位天文学家 Hubble 开始证认了这种旋涡星云乃是银河系之外的恒星集团. 这样的恒星集团被统称为星系. 随着越来越多的河外星系被发现使人们逐渐意识到,宇宙可被看成以星系为"分子"所组成的"气体". 我们的银河系只是宇宙中的一颗普通的分子. 这样,如果其他分子都在向远离我们的方向运动,则它是宇宙介质在膨胀的证据. 于是 Slipher 等人的发现成了宇宙膨胀观念的发端.

到 1929 年,Hubble 进一步发现了星系退行的定量规律,即各星系的退行速度与距离成正比. Hubble 的发现远不是仅以更多的事实肯定了宇宙膨胀的观念,它还为膨胀提供了更多的信息. 用一点物理知识就能推知,如果宇宙是均匀介质,那么他的经验规律表明,宇宙是按能够保持其均匀性的惟一方式在膨胀. 这对 Einstein 的宇宙均匀性假设是一种支持.

同一时期里理论研究也在发展. 在当时,宇宙的均匀性以及宇宙动力学服从广义相对论看来都是无可替代的工作假设,所以 Einstein 后的研究者把它们沿用了下来. 在这样的前提下,Einstein 的静态模型仅是一种可能. 当时许多其他可能也得到了研究. 今天最值得注意的是 Friedmann 的膨胀宇宙模型. 它也出现在 1923 年. Friedmann 理论的出发点是采用不含宇宙常数[①]的引力场方程. 这样,宇宙在引力影响下的膨胀全过程可以解出. 按这模型的结果,远处星系的光谱应当因宇宙的膨胀而有红移,而且

① 参看第四章的讨论.


需要全本请访问 www.ertongbook.com

不太远的星系的红移量应当与距离成正比. 它与 Hubble 在几年后的发现[①]是一致的.

今天回顾这段历史,看来宇宙学初期的进展非常健康. 在 10 年左右的时间里,不仅在观测上肯定了宇宙的膨胀,而且在理论上建立了相应的模型. 可是在此后的 30 多年里,物理宇宙学的发展中却是挫折多于成功. 究其原因,这里既有来自学科本身的问题,也有来自认识论上的干扰.

把 Hubble 的经验规律写成 $v \propto d$,其中的比例系数被后人称为 Hubble 常数,记做 $H_0$. 当时得到的实测值是 500 $\mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$. 它比今天知道的值(约为 70 $\mathrm{km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}}$)大了 7 倍左右. 理论上的宇宙年龄与 $H_0$ 成反比,因此它所预言的宇宙年龄仅为应当值的 1/7. 按当时结果推出的宇宙年龄为 20 亿年左右,可是人们有可靠证据表明地球的年龄在 40 亿年以上. 这里出现的明显矛盾,成了人们怀疑膨胀宇宙理论的重要原因.

从物理学的眼光看,当时这理论的两个前提(指宇宙的均匀性和宇宙服从广义相对论)都没有可靠的根据,而它的推论又与事实明显地不符(指宇宙年龄太小),因此学术界不接受它是正常的. 可是膨胀宇宙理论实际上遭到的是贬斥. 这里不能不提到认识论上的因素. 按照 Friedmann 模型,宇宙的膨胀必定有一个时间上的起点,今天的宇宙必定有一个有限大的年龄. 这说明宇宙有它的"创生". 可是人们把这结果看成是科学在向宗教靠拢. 这是膨胀宇宙理论遭到贬斥的思想因素. 今天回头看历史,它不仅很有哲理性,也很有讽刺性. Copernius 的日心说曾因触犯了神学而遭到过宗教的惩罚. 可是宇宙学却因被怀疑向神学献媚,而遭到过急于要与宗教划清界线的人们的惩罚.

此后由于第二次世界大战,宇宙学研究自然地停滞了好几年.

---

① 虽然 Friedmann 模型预言了 Hubble 发现的经验规律,可是 Hubble 很可能完全不知道.

到 20 世纪 40 年代末，一位笃信 Friedmann 宇宙理论的物理学家 Gamow 进一步提出了宇宙演化的思想. 这当然是宇宙学研究中划时代的一笔. 类似于 Darwin 的进化论讲一切生物物种都是演化产生的，Gamow 指出，一切物质形态都不是亘古不变的，而是在宇宙膨胀过程中演化产生的. 恒星和星系在远古的宇宙中都不能存在. 在它们形成之前，宇宙只是一片炽热的迅速地膨胀着的均匀气体. Gamow 通过研究发现，连化学元素这样的基本物质形态也是在膨胀的炽热气体中产生的. 他估出了元素氦的原初产额，它与今天实测的氦丰度相接近. 可是由于上面谈到的原因，他的理论不仅没有得到学术界的认可，而且被斥之为伪科学. 今天人们习惯地把 Gamow 的理论称为宇宙热大爆炸理论，其实这名称是来自反对者的讥讽.

由 Friedmann 奠基而由 Gamow 发展的宇宙模型终究是一个物理理论. 它的正确与否是只能由事实来甄别的. 物理学史告诉我们，新理论事先提出的预言若事后得到观测的证实，这常是该理论正确性的重要标志. Gamow 曾在 20 世纪 50 年代初提出过一个预言：今天的宇宙中应仍存在温度为 10 K 左右的背景光子气体，它是宇宙年龄仅为 10 万年时留下的遗迹. 这预言无疑是可以用观测来证实或证伪的. 可是当时竟没有人愿意做这种努力.

到 50 年代的中后期，天文学家对 Hubble 常数 $H_0$ 的测量有了进步. 人们开始知道，$H_0$ 实际值应在 $50\sim100\ \mathrm{km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}}$ 的范围内. 这样，理论上宇宙年龄过小的明显矛盾已不复存在，可是这进步不足以改变学术界对宇宙学的态度. 直到 1965 年，大爆炸理论预言的低温背景辐射被偶然发现，并且随后的大量观测研究证实了这一发现. 从这时候起，才有越来越多的人开始意识到，由 Hubble-Friedmann-Gamow 奠基的宇宙理论是值得认真对待的. 因此大体地说，宇宙学研究的蓬勃发展是从 70 年代开始的.

在最近的 30 年中，全世界在宇宙学研究中投入的人力和物力都很大，而相应的收获也十分丰富. 宇宙学作为以现实客体为对象

的物理理论，首要的问题是细致地引申出理论的推论以及用实测来检验它. 对于已有大量星系存在的晚期宇宙，Friedmann 模型有很多可供检验的推断. 对于一切星系形成之前的早期宇宙，被深入地研究过的是背景辐射问题和原初核合成问题. 它们也都有需要并可以检验的预言. 于是，这两方面的研究构成了物理宇宙学的核心. 我们将在正文的第二、三部分中分别作详细的讨论. 至今两方面的理论都与事实符合得很好. 这是宇宙学理论框架已可靠地确立的标志.

从 20 世纪 80 年代起，在一系列成功的鼓舞下，宇宙演化史中几乎一切重要问题的研究都开展了起来. 原初核合成过程发生在宇宙年龄为 1 s 之后，而若干很深刻的问题却需要由更早(即 $t \ll 1$ s)的宇宙演化来回答. 例如核合成开始时为什么没有反核子存在，暗物质的本源是什么等. 因有关过程涉及的是粒子物理的能量尺度，所以这领域被称为粒子宇宙学. 我们将在正文的第四部分中讨论. 再一个重要方面是星系的形成. 标准模型是宇观地看宇宙，因此把宇宙当成了均匀介质. 可是星系的存在表明在天文尺度上物质是结团的. 一个成熟的宇宙理论必须回答，物质的结团是怎么发生的. 这问题在近 20 年里也有很大进展. 我们把这课题的讨论归入第五部分.

上面指出的四个部分是本课程的主要内容. 除了宇宙创生问题之外，至今被深入研究过的方面本书都涉及到了. 可是研究宇宙要以一定的天文知识作基础，因此宇宙学的讨论需要从认识恒星和星系开始. 正文的第一部分就是为此而提供的准备. 此外，在本书的附录中还简单介绍了粒子物理的全貌，这是为讨论早期宇宙所作的准备.

# 目　　录

引言 …… (1)

## 第一部分　恒星和星系

第一章　恒星的性质 …… (9)
1.1　恒星的距离和光度 …… (9)
1.2　表面温度与光谱 …… (15)
1.3　Hertzsprung-Russell 图 …… (21)
1.4　主序星的结构理论 …… (24)
1.5　恒星的形成 …… (30)
1.6　主序后的演化 …… (33)
1.7　变星与测距 …… (39)
第二章　星系的性质 …… (45)
2.1　银河系 …… (45)
2.2　河外星系的发现 …… (48)
2.3　星系的分类 …… (50)
2.4　星系质量的测定 …… (52)
2.5　星系的距离测量 …… (56)
2.6　星系的一般性质 …… (60)
2.7　星系群和星系团 …… (63)

## 第二部分　宇宙学基础

第三章　宇宙学基本事实 …… (69)
3.1　宇宙学原理 …… (69)

3.2 Hubble 膨胀 …… (72)
3.3 宇宙年龄的测定 …… (77)
3.4 宇宙密度的测量 …… (80)
3.5 物质的组分 …… (84)
第四章 宇宙膨胀的动力学 …… (89)
4.1 基本假设 …… (89)
4.2 相对论性的引力 …… (91)
4.3 宇宙常数和真空能 …… (95)
4.4 Robertson Walker 度规 …… (98)
4.5 宇宙动力学方程 …… (102)
4.6 Einstein 的静态模型 …… (105)
4.7 宇宙整体参量的推定 …… (107)
4.8 实物为主宇宙的膨胀解 …… (109)
4.9 宇宙的年龄 …… (113)
4.10 红移-距离关系 …… (116)
4.11 宇宙的视界 …… (122)

## 第三部分 宇宙的早期

第五章 早期宇宙概况 …… (127)
5.1 热大爆炸的概念 …… (127)
5.2 辐射为主的早期 …… (130)
5.3 零化学势的理想气体 …… (133)
5.4 温度随时间的变化 …… (137)
5.5 宇宙演化简史 …… (139)
5.6 粒子的退耦 …… (142)
5.7 非重子暗物质的候选者 …… (145)
第六章 光子背景辐射 …… (148)
6.1 原子的复合过程 …… (148)
6.2 背景光子的形成 …… (152)

6.3 背景光子的可观测性质 …… (154)
6.4 发现和证实 …… (158)
6.5 偶极各向异性 …… (161)
6.6 多极各向异性 …… (163)
第七章 大爆炸核合成 …… (167)
7.1 原初的核合成过程 …… (167)
7.2 中子数与质子数之比 …… (170)
7.3 产额的计算方法和结果 …… (173)
7.4 $^4$He 原初丰度的实测推断 …… (176)
7.5 中微子的种数问题 …… (180)
7.6 氘的原初丰度 …… (183)
7.7 $^3$He 的原初丰度 …… (186)
7.8 关于原初的锂 …… (188)
7.9 对现状的评述 …… (190)

## 第四部分 粒子宇宙学初步

第八章 正反物质的不对称 …… (195)
8.1 探寻反物质天体 …… (195)
8.2 正反物质不等量疑难 …… (197)
8.3 关于重子数的守恒 …… (199)
8.4 正反粒子微观上的不对称 …… (201)
8.5 对热平衡的偏离 …… (204)
8.6 一种示意性的模型 …… (204)
8.7 理论现状简述 …… (207)
第九章 甚早期宇宙的暴胀 …… (209)
9.1 对称性自发破缺的机理 …… (209)
9.2 含自作用 $\phi$ 场的高温真空 …… (211)
9.3 真空为主引起的暴胀 …… (214)
9.4 早期宇宙的视界疑难 …… (217)

需要全本请访问 www.ertongbook.com