

宇宙学引论

冯麟保 著

67

9

科学出版社

宇宙学引论

冯麟保著

科学出版社

1994

内 容 简 介

本书是学习宇宙学的入门书,书中详尽全面地讲述了有关宇宙学的基本理论及其建成和发展过程,并简明扼要地介绍了宇宙学这一学科在理论与观测所取得的宇宙信息相互印证上的概念更迭以及该领域近期的理论研究成果和观测现状。

全书共分十章,内容包括宇宙结构学、宇宙运动学、宇宙动力学、标准宇宙模型、观测宇宙学、宇宙演化学、暴胀宇宙、宇宙大尺度结构、其他宇宙理论、大数假说和人择原理,并在书后收有三个附录。

本书可作为我国高等院校理工科高年级大学生和研究生的教学用书,只要求同学略具相对论和粒子物理等方面的某些知识;也可供对宇宙学有兴趣的读者和有关专业的研究人员和教师参考。

宇宙学引论

冯麟保著

责任编辑 张邦固

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

河北师范大学印刷厂印刷

*

1994年10月第一版

开本:850×1168 1/32

1995年4月第二次印刷

印张:8 1/2

印数:1001—1500

字数:223 000

ISBN 7-03-004402-9/O·764

定价:10.00元

序

近十年来,我国学者已出版了一批广义相对论和引力方面的著作,但宇宙学方面的专著,尚付阙如,河北师范大学冯麟保教授的力作《宇宙学引论》正好填充了国内图书的这一空白.

一本书是否有价值,在于它是否具有特色,如果只是资料的堆砌,那就没有什么意义.《宇宙学引论》一书就是这样一本具有自身特色的书,它着重对观测宇宙学、核天体物理及各类宇宙理论进行了迄今少见的详尽的介绍;我深信,从事天体物理研究和对宇宙演化感兴趣的一般读者,将会从冯麟保教授的这一辛勤劳动的结晶中得到很大的帮助.

北京师范大学物理系 刘辽

1994年1月于冀园

前 言

“宇宙”一词，泛指天地万物，亦即在浩瀚的空间中运动和变化着的全部物质世界的总称。人们对宇宙的认识，从大地星空到太阳系，再扩展到银河系、河外星系、星系团、乃至观测所及的宇宙。目前，人们的视野已经延伸至一百多亿光年的宇宙“深处”；这不仅意味着直接观测到的宇宙在空间尺度上是多么广袤庞大，而且也表示我们能够追溯到宇宙在时间尺度上长达一百多亿年的古远过去。

现代宇宙学可以看作是把整个自然科学，特别是把物理学和天文学结合起来，对大尺度时空进行研究的一门学科，它从整体角度研究宇宙的结构和演化。

现代宇宙学是由爱因斯坦于1917年发表的题为《根据广义相对论对宇宙学所作的考查》一文揭开序幕的。其后，德西特、弗里德曼和勒梅特等人各自独立地从爱因斯坦引力场方程求得了各种不同的膨胀宇宙解。1929年，哈勃在前人观测工作的基础上总结出河外星系的退行速度与其距离成正比的规律。人们认为，表述速度-距离（或等价的红移-视星等）线性关系的著名哈勃定律，反映了众多星系所在的宇宙空间整体在膨胀，或者说它提供了广义相对论所预言的演化型宇宙膨胀的观测证据（爱丁顿）；而相对论宇宙学从此便在宇宙理论中占据了主导地位。

如果我们追溯膨胀宇宙的去，那么宇宙中的物质在更早时期必然曾经是高度密集的，而且会有一个体积趋于零和物质密度趋于无限的状态，在数学上叫作“奇点”。彭罗斯和霍金先后证明了：在广义相对论的理论框架内，这一时空曲率趋于无限的初始奇点是不可避免的。与该奇点紧密相关的早期宇宙应当是非常炽热和极其稠密的。事实上，这样的观点远在微波背景辐射发现之前就已出现。1932年，勒梅特曾提出关于宇宙的“原初原子”爆炸起源

的概念；后来，40年代末伽莫夫等人又有所发展，建立了所谓的“（热）大爆炸宇宙学”。他们提出这一理论的最初目的，原只是为了阐明宇宙中各元素的起源和丰度，并以为所有的元素都是在宇宙大爆炸的初始瞬间形成的，但尔后的理论研究表明，宇宙的核合成只能到氦4为止。这一理论除了计算出核合成的氦丰度不低于25%以及据此断言光子和重子二者的数密度之比约为 10^9 外，还预言了应该存在一个残余的5K宇宙背景辐射。1957年，伯比奇夫妇、福勒和霍伊耳等人提出了一种简称为 B^2HF 的理论，认为除了氢以外的所有元素都是在恒星内部逐步产生的；据此所作的计算表明：恒星内部核反应生成的氦丰度只有3—5%；综合观测结果，证实了在“大爆炸”初期阶段宇宙的核合成所产生的氦丰度恰如理论所预言的那样在23—25%之间。1965年，彭齐亚斯和威尔逊在《天体物理杂志》报道了他们一年来在7.35cm波长上收到的微波噪声是稳定的而且与方向无关，并据以宣称“有效天顶噪声温度的测量比预期值高3.5K”；而迪克和皮伯斯等人立即对这一观测结果作出宇宙学的解释，他们在该刊物的同一期上指出：这一高度各向同性且具有黑体谱的3K背景辐射，正好就是早期遍布于整个宇宙空间的辐射在与物质脱离热接触后其能量密度因宇宙膨胀而降低了的遗迹。这一微波背景辐射能够为我们提供更为古老的宇宙信息，它的发现被认为是自哈勃定律提出以来现代宇宙学研究中又一项意义重大的成就。

大爆炸宇宙理论从宇宙膨胀是按“绝热”方式进行的假设出发，结合弗里德曼方程、宇宙组分的连续性方程及其物态方程等，导出了有关宇宙的尺度、年龄、密度和温度等这样一些重要的物理量相互间的关系；从而使我们能够对宇宙自大爆炸开始后不久（例如普朗克时间 10^{-43} s）直到今天（ $\approx (1-2) \times 10^{10}$ a）的演化全过程有了一个基本的了解。根据大爆炸宇宙学的观点，宇宙是在大约一二百亿年前从一个密度极大和温度极高的原初火球开始的，这时整个宇宙空间充满了由处于热平衡的各种基本粒子组成的炽热气体，这种气体随同空间一起膨胀并逐渐冷却。宇宙的不断膨胀导致

其温度持续下降,强子和轻子先后湮没;当温度降至 $4 \times 10^9 \text{K}$ 时,宇宙的组分变得以光子和中微子为主,还拥有极少量的质子、中子和电子.随着宇宙的膨胀,中子和质子结合成氦核,并进一步形成氦核;当温度下降到 4000K 左右时,原子氢复合开始,辐射与物质退耦,宇宙变得透明,此后的辐射与物质便彼此独立地继续演化,二者的温度不再相同.时至今日,辐射温度已降低到 3K 以下,而气态物质则在引力的作用下逐渐凝聚成星云乃至恒星和星系等各类天体,成为我们现在观测到的宇宙.

大爆炸宇宙学不仅在阐明大量与天体现象有关的宏观和微观的特征与过程(例如:哈勃定律、轻核合成、辐射残余、强子质化、原子复合、宇宙透明、以至后来的星系形成等等)上取得了很大的成功,而且与近代物理学(包括粒子物理、原子核物理、原子物理、等离子体物理、天体物理等)彼此渗透和促进,交互印证,相得益彰.大爆炸理论不再局限于只讨论宇宙整体在引力作用下的动态行为,而是把研究的范围扩展到涵盖热宇宙内部演化进程中发生的所有重大事件,特别是对早期和甚早期宇宙物质的组分构成及其转化演变的细节也进行了相当深入的探讨.理论上认为应当发生的许多具有代表不同演化阶段特征的事件和过程,基本上全都得到了观测所揭示的宇宙信息直接或间接的证实.尽管标准大爆炸宇宙模型在完善宇宙图景的描述方面所取得的成就是巨大的;但是,在有关宇宙大尺度的均匀各向同性、宇宙究竟是开放的还是闭合的(特别是早期宇宙何以那样高度平坦)、以及观察不到大统一理论所预言应当大量存在的质量高达 10^{16}GeV 的磁单极等等,还存在着若干无法作出解释的问题.

面对标准热宇宙模型遇到的均匀性疑难(亦即视界疑难,因为问题产生于甚早期宇宙中含有了数目巨大的由视界限定的无因果联系区)、平坦性疑难以及磁单极疑难等,人们于 80 年代初提出和发展了一种叫作“暴胀宇宙”的理论.这种理论认为:宇宙(或其部分区域)从一个电力、弱力、强力三种力大统一的“假真空”对称态缓慢地向另一个轻子和夸克不再能够相互转化且其能量密度比前

者更低的“真真空”破缺对称态过渡。当温度降低到大统一温度 ($T_{\text{GUT}} \approx 10^{27} \text{K}$) 以下时, 宇宙开始处于过冷的亚稳对称态; 在此期间, 宇宙以真空能量为主, 因而将经历一个与德西特宇宙行为相类似的按指数律 e^{Ht} 暴胀的阶段。随着温度的急剧下降, 假真空态向真真空态过渡的一级相变发生; 一俟相变完成, 真空能以相变潜热的形式释放, 宇宙温度重新上升到接近 T_{GUT} , 暴胀终止; 此后, 宇宙就又按标准模型所确定的方式继续其正常的绝热膨胀 ($R \propto t^{1/2}$)。由此可见, 只要暴胀持续的时间 τ 足够长 (一般取 $\tau \approx 10^{-32} \text{s}$), 则宇宙的尺度因子 R 于暴胀后将增大 $Z (= e^{H\tau} \gg e^{67} = 10^{29})$ 倍; 于是宇宙的空间曲率 (严格说来应是曲率项与能量项二者的比值 $\epsilon [= (k/R^2)/O(M^4)]$) 在暴胀之后要减少为胀前的 $1/Z^2$, 而今天我们观测到的宇宙在大统一时代之初 (即暴胀前) 就已被容纳在一个光滑区域 (即视界) 之内了。这样 (或根据在相变阶段宇宙总熵的急剧增加), 平坦性疑难和视界疑难就获得解决; 至于磁单极至今也不曾被我们观测到的疑难, 也可采用其密度因宇宙的暴胀而大为稀释 (或作为拓扑结构位于光滑区边缘) 予以说明。在粒子物理大统一理论基础上提出的宇宙在甚早期经历过一个暴胀阶段的方案, 成功地解决了宇宙学中那些带有根本性的疑难, 弥补了标准宇宙模型的不足, 而且使标准宇宙模型中必须作为初始条件的许多假设变得不再是必要的。然而, 虽然早先的暴胀宇宙模型还能宇宙在小尺度上的不均匀性的起源 (即星系的形成) 提供可信的机制, 但是计算给出的密度扰动幅度却比观测所容许的值高出好几个数量级。近十多年来, 人们陆续提出了许多新模型 (例如建立在超对称性理论上的暴胀宇宙模型、原初暴胀模型和混沌暴胀宇宙模型等等), 这些模型在改进早先的暴胀理论上大都取得了一定的进展, 但同时却又往往引发出另一些深层次的新问题。看来, 成功的暴胀宇宙模型的建立, 或许得寄期望于粒子物理理论的突破性发展了。

本书较详细地讲述有关宇宙学主要方面的基本理论及其建成和发展, 并扼要介绍这一学科在理论与观测所取得的宇宙信息相

互印证上出现的概念更迭以及该领域近期的重大研究成果和观测现状。

全书共十章。前五章讲述的是公认为标准的相对论宇宙学的背景材料和理论基础：第一章概括介绍组成宇宙基本单元的星系在空间的分布情况以及根据普遍存在的星系谱线红移得出的哈勃定律；同时还对怎样测定星系的距离和质量作了足够的说明。第二章从宇宙学原理出发，由大尺度时空的几何性质导出描述均匀各向同性宇宙的罗伯逊-沃克度规，并据以引进宇宙视界概念，给出视星等-红移关系和星系计数等重要计算公式。第三章分别根据牛顿理论和广义相对论导出描述演化宇宙的尺度因子在形式上相似的微分方程，并指明两种理论在这一问题上的异同和联系。第四章详细讨论了在不同动力学条件下的各种均匀各向同性的所谓标准宇宙模型。第五章先是把宇宙学的各计算公式中的相对论参量改用观测参量来表示，接着介绍观测宇宙学对理论模型的三大经典检验细节；最后，根据最新的观测数据，确定出各宇宙学参量(t_0 , H_0 , q_0 , λ_0 和 σ_0 或 Ω_0)的可能取值范围。第六章从讨论宇宙中的背景辐射具有黑体谱性质开始，依次追溯了在过去不同时期宇宙组分的变化中发生的重大事件，比较详细地阐述了宇宙从大爆炸后不久直到今天的全部热历史。以上六章构成本书的主体，它反映了相对论宇宙学七十多年来研究的主要成果与进展概况。

第七章和第八章介绍了原始暴胀模型和新暴胀模型在解决标准宇宙模型所面临的各种疑难上各自取得的成就和不足，以及在牛顿力学和广义相对论基础上通过将金斯不稳定性应用于膨胀宇宙来计算密度不均匀性的增长。这两章关于暴胀宇宙模型和星系形成图景的论述，尽管只是初步的和基本的，但是这里所提供的必要的基础知识，据信将有助于进一步寻求更合理的暴胀模型和探索各类暗物质与大尺度结构形成间的相互关系。第九和第十两章概括地评述了与相对论宇宙学相关或完全独立于其外的其他各种宇宙理论，并对大数假说和人择原理以及粒子物理与宇宙的结构和演化二者之间的相互制约等方面作了较为深入的讨论。这两章先后列举的近十种观点各异的宇宙学，虽说不上囊括齐全，但不论

是起过历史作用还是迄今仍在发展的主要理论基本上全都涉及到了。阅读这些材料,对人们在不同的前提和背景下提出的各种宇宙理论的缘起和发展可以有一个比较全面的了解,进而从其各自特有的思路 and 手法中汲取有益的启迪和借鉴。此外,在书后还收有一个附录,其中开列了在宇宙学中经常要用到的关于自然单位换算以及各基本物理常量和重要宇宙学参量的精确值,可供读者检索参考。

本书是在作者多年来为理论物理专业研究生讲授“宇宙学”课程的三次讲稿基础上编写而成的。有鉴于目前国内有关宇宙学方面的论述大多作为“天体物理”或“广义相对论”教材的一个组成部分,篇幅有限,难臻全面;而较为完整独自成书的著作似尚阙如。为此,本书的编写以宇宙学的基本理论为主,着重突出新概念的物理涵义和重要宇宙学公式的导证;对于宇宙信息观测方面,虽未详述其技术细节,但对有关数据的取得,也大多作了适度的概略性介绍。作为研习宇宙学的入门,本书力求做到叙述严谨,推演详尽;希望它既可为读者自学提供便利,更能为进一步阅读宇宙学领域的文献和专著起到有用的桥梁作用。

本书可作为我国高等院校理工科高年级大学生和研究生的教学用书,只要求同学略具相对论和粒子物理等方面的某些知识(对于学时较少的课程,可作适当剪裁,例略去七、八两章不讲,或仅选讲前六章);它也可供对宇宙学有兴趣的读者或有关专业的研究人员参考。

本书的完成和出版得到国家自然科学基金的资助。

最后,承蒙中国引力与相对论天体物理学学会理事长刘辽教授仔细审阅了全部手稿,并为本书撰写了热情洋溢的序,作者对此深表由衷的感谢。此外,同窗挚友书法家李致中先生为本书题写了书名,张素德教授和刘英硕士在本书付印前的整理核校全过程给予了大力襄助,也应在此一并致以谢忱。限于个人的水平,疏漏谬误之处当不在少,恳请专家和读者赐予批评指正。

冯麟保

1994年1月于河北师范大学

目 录

序

前言

一、宇宙结构学	(1)
1.1 宇宙的大尺度结构	(1)
1.2 宇宙距离尺度	(3)
1.3 星系的质量	(11)
1.4 红移与宇宙膨胀	(15)
二、宇宙运动学	(18)
2.1 均匀各向同性宇宙的时空	(18)
2.2 红移与视界	(22)
2.3 视星等-红移关系	(28)
2.4 星系的数密度与星系计数	(31)
三、宇宙动力学	(35)
3.1 相对论前宇宙学存在的问题	(35)
3.2 牛顿宇宙动力学	(37)
3.3 相对论宇宙动力学	(40)
四、标准宇宙模型	(45)
4.1 均匀各向同性宇宙的标准模型	(45)
4.2 静态宇宙模型与空虚宇宙模型	(49)
4.3 $\Lambda=0$ 的弗里德曼宇宙	(57)
4.4 $\Lambda \neq 0$ 的弗里德曼宇宙	(60)
4.5 充满辐射的宇宙	(63)
五、观测宇宙学	(66)
5.1 相对论参量与观测参量	(66)
5.2 宇宙学的经典检验	(73)
5.3 观测现状:宇宙学参量的确定	(79)

六、宇宙演化学	(89)
6.1 热宇宙及其微波背景辐射	(89)
6.2 早期热宇宙与原初核合成	(94)
6.3 甚早期宇宙及重子数的起源	(112)
6.4 宇宙的热历史	(119)
七、暴胀宇宙	(125)
7.1 标准宇宙模型面临的困难	(125)
7.2 原始暴胀宇宙	(130)
7.3 新暴胀宇宙	(136)
7.4 密度不均性的起源	(148)
八、宇宙大尺度结构	(158)
8.1 微小密度扰动的演化	(158)
8.2 密度扰动谱及其成型	(171)
8.3 宇宙暗物质与大尺度结构的形成	(179)
九、其他宇宙理论	(191)
9.1 米尔恩宇宙学	(191)
9.2 稳恒态宇宙学	(194)
9.3 布兰斯-迪克宇宙学	(197)
9.4 重子对称宇宙学	(201)
9.5 混沌宇宙学	(206)
9.6 等级式宇宙学	(211)
十、大数假说与人择原理	(218)
10.1 自然界中的物理常量	(218)
10.2 大数假说与大数序列	(222)
10.3 狄拉克宇宙学	(228)
10.4 宇宙结构与粒子物理	(233)
10.5 人择宇宙学	(242)
单位换算 基本物理常量 宇宙学参量	(246)
参考书目及文献	(250)
中英文人名对照表	(253)

— 宇宙结构学

1.1 宇宙的大尺度结构

在空间的大尺度上,组成宇宙的基本结构单元是星系;而星系则是由在万有引力作用下聚集到一起的各种天体构成的庞大系统,包括恒星、双星、聚星、星团、星云、分子云、星际尘埃、宇宙线、以及延伸的星际磁场等.已观测到的星系差不多有 10^{11} 个,它们依类型的不同而分别拥有 10^4 — 10^{13} 颗恒星;星系的尺度范围为 10^4 — 10^6 光年(记作 l. y.), 相邻星系间的平均距离约为 3×10^6 l. y.. 银河系是一个典型的旋涡星系,其线径约为 1.2×10^5 l. y., 系内各类恒星的总数估计为 $(1-2) \times 10^{11}$ 颗. 太阳是一颗典型的恒星,它到银心的距离约为 3×10^4 l. y..

星系单独存在的情况并不多见,据估计单个星系的数目不会超过星系总数的 15%;绝大多数的星系倾向于成团分布,它们按成员数目的多少组成双重星系、多重星系、星系群和星系团. 在银河系附近的 3×10^4 l. y. 范围内,有一个分别以银河系和仙女座星系(M31 或 NGC224)为中心,总数在 40 个以上的星系组成所谓本星系群;其中有一个由银河系和大、小麦哲伦云组成的三重星系和一个由仙女座三重星系(M31, M32, NGC205)、三角座星系(M33 或 NGC598)以及三个矮星系组成的七重星系,下余的多为椭圆星系或不规则星系. 本星系群的体积约为 $6.5 \times 5 \times 3.2 (M \text{ l. y.})^3$, 其总质量则为 $6.5 \times 10^{11} M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ 为太阳的质量). 在距离为 4.2×10^6 至 7.8×10^6 l. y. 的空间范围内,我们没有观测到星系的存在. 在 3.2×10^7 l. y. 的距离内有 14 个星系群,离我们最近的是玉夫座星系群、大熊座星系群和天炉座星系群,其成员星系数为 6 至 16 个不等. 在 5×10^7 l. y. 的距离内有 54 个星系群,平均每隔 2.3×10^7 l. y. 就有一个星系群,其直径范围为 $(1.6-13) \times 10^6$ l. y., 平均

约为 $6.5 \times 10^6 \text{ l. y.}$.

离我们最近的不规则星系团是距离为 $6.2 \times 10^7 \text{ l. y.}$ 的室女星系团, 拥有 2500 个以上的星系, 其直径为 10^7 l. y. , 各成员星系间的距离范围为 $(3-6) \times 10^6 \text{ l. y.}$. 离我们较近的规则星系团是距离为 $3.6 \times 10^6 \text{ l. y.}$ 的后发座星系团, 其直径约为 $1.3 \times 10^7 \text{ l. y.}$, 成员星系总数可能多达 10000 个. 然而, 像这样范围较大且星系众多的星系团为数不多; 平均说来, 各星系团内的成员星系数约为 130 个, 而各星系团之间的距离约为 $3 \times 10^7 \text{ l. y.}$. 目前观测到最远的星系团的距离在 $9 \times 10^8 \text{ l. y.}$ 左右, 观测到的星系团总数超过 10000 个.

若干星系团还可进一步聚集组成所谓超星系团. 本超星系团是一个长径为 10^8 l. y. 、厚度为 $6 \times 10^6 \text{ l. y.}$ 的扁平状天体系统, 由本星系群、室女星系团、后发座星系团、大熊座星系团及其他约 50 个较小的星系群或星系团组成, 总质量约为 $10^{15} M_{\odot}$. 距离远在 $7.2 \times 10^8 \text{ l. y.}$ 处的武仙座超星系团, 所占据的空间体积约为 $2 \times 10^6 (\text{M l. y.})^3$, 由阿贝尔星系团 2147, 2151, 2152 和若干星系团组成, 其内在距离 $(4-6) \times 10^6 \text{ l. y.}$ 间呈现出没有星系存在的广大空白区域. 超星系团的成员星系团数最少为 2—3 个, 一般在 5—10 个之间, 拥有几十个成员星系团的超星系团不多. 已发现的 50 个超星系团的成员数大多为 10 个或 11 个, 最大的一个拥有 29 个成员星系团; 超星系团的平均直径为 $2 \times 10^8 \text{ l. y.}$, 总质量高达 $10^{15} - 10^{17} M_{\odot}$, 大约每 $3 \times 10^8 (\text{M l. y.})^3$ 的空间内就有一个超星系团. 观测结果表明, 星系团有沿长条形链排列的倾向, 而为数众多的星系则作片状分布, 于是我们得到所谓宇宙的分格结构: 在尺度为 $3 \times 10^8 \text{ l. y.}$ 数量级的立体格子内部没有或只有很少星系, 大量的星系位于格面之上, 沿格棱的星系数目增多, 在格子顶点处星系更为密集. 超星系团的存在表明, 宇宙的物质分布在 10^8 l. y. 的数量级范围内是不均匀的; 但在更大尺度(例如 $3 \times 10^9 \text{ l. y.}$)的空间里, 星系的分布却呈现出均匀性和各向同性.

在宇宙中, 除了可以观测到的星系外, 还存在着其他物质, 例

如已不再辐射的星系、大大小小的黑洞、以及星系际气体和尘埃等等。如果不考虑这些错综复杂和较难确定的情况,则根据星系计数给出宇宙现在的星系质量密度为

$$\rho_G \approx 3 \times 10^{-28} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}. \quad (1-1)$$

星系际物质主要由氢组成;星系际尘埃(可能是固态氢的大雪片)对宇宙物质密度的贡献不到 ρ_G 的 1%;原子氢(H I)和分子氢(H_2)的贡献比尘埃还要小些,但是星系团内的电离氢(H I)对宇宙物质密度的贡献很大,可能达到 ρ_G 的 10 倍。此外,星系外围的星系晕和星系冕内部的物质分布尽管很稀薄,但其总质量却可以比星系本身的质量大若干倍,它们的存在将使星系质量密度 ρ_G 的值有所提高。

宇宙中还有各种频率的辐射,其中既有从个别天体发出的定向辐射,也有不是源于分立源的各向同性的微波背景辐射。通过质能关系($E = mc^2$)求得的这一辐射密度仅为

$$\rho_r \approx 5 \times 10^{-31} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 10^{-3} \rho_G. \quad (1-2)$$

据估算,宇宙线和中微子对宇宙密度的贡献在数量级上都与上述辐射大体相近。在目前,确定宇宙动力学的主要因素是星系质量,因此可以不去考虑比该质量低得多的辐射;然而在过去,辐射在演化的宇宙中曾经占过优势,上面提到的微波背景辐射实际就是远古辐射的遗迹。

1.2 宇宙距离尺度

宇宙中各类天体距离的测定主要采用的是视差法和光度法。

三角视差测距法 取长度为 $2b$ 的两个点 A 和 B 的连线为基线,则待测天体 O 的距离可由图 1 所示的三角关系

$$D = b \cotg p \approx b/p \quad (1-3)$$

确定,角 p 叫做 O 相对于 AB 的视差。

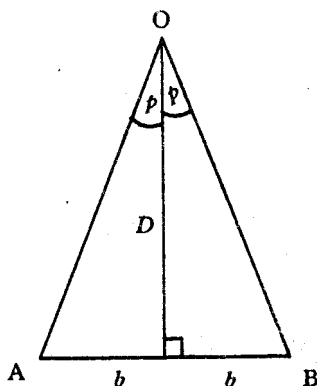


图 1 三角视差

日地间的平均距离 $a_{\oplus} = 1.496 \times 10^{11} \text{m}$ 叫做天文距离单位, 或简称天文单位, 记作 A; 它提供了测量太阳系以外的天体距离所需的基线尺度。

宇宙距离的基本单位, 除用光年 ($1 \text{ l. y.} = 3 \times 10^8 \times 3.15 \times 10^7 = 9.46 \times 10^{15} \text{m}$) 外, 还定义了一个叫做秒差距 (即视差为 1 角秒) 的长度单位 (记作 pc):

$$\begin{aligned} 1 \text{ pc} &= 1 \text{ A} / 1'' = 3600 \times 180 \text{ A} / \pi = 206265 \text{ A} \\ &= 3.086 \times 10^{16} \text{m} = 3.26 \text{ l. y.}; \end{aligned}$$

更大的距离单位有千秒差距 ($1 \text{ kpc} = 10^3 \text{ pc}$) 和兆秒差距 ($1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$)。因此, 以秒差距为单位的星体 (例如恒星) 的视差距离由下式给出:

$$D_p = p^{-1}, \quad (1-4)$$

式中 p 的单位为角秒。用三角法所能测定的最小视差决定于最大望远镜的分辨本领, 因此至多能够精确地量出大约 30 pc (不超过 50 pc) 范围内的近邻星, 其总数至少有 6000 颗。

移动星团法和统计视差法 恒星在空间运动的速度 v 可沿其视线方向和与视线垂直的方向分解为视向速度 v_r 和横向速度 v_t ; 前者的大小可以通过恒星谱线的多普勒频移来确定, 而后者则由观测到的恒星自行 μ 按下式给出*:

$$v_t = 4.74 \mu D, \quad (1-5)$$

式中的 D 是以 pc 计的待测距离, μ 的单位是角秒 $\cdot$ 年 $^{-1}$ (记作 " $\cdot$ a $^{-1}$ "), v_t 的单位是 $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

距离 D 不能简单地通过测量 v_r 和 μ 来确定。我们考虑两种极限情况: (1) 空间速度近似相同的若干恒星组成所谓星流, 它们的自行具有从一个辐射点散开或向一个汇聚点会集的倾向。设汇聚点方向 (即 v 的方向) 与星流的视线方向 (沿 v_r 方向) 所成的角度为 θ (图 2), 则由 $v_t = v_r \tan \theta$ 及式 (1-5) 可以求得所谓自行距离:

$$1'' \cdot \text{a}^{-1} \cdot \text{pc} = \frac{3.086 \times 10^{13}}{2.06 \times 10^5 \times 3.16 \times 10^7} \text{rad} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1} = 4.74 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

$$D_r = v_r \tan \theta / 4.74 \mu;$$

式右的 v_r , θ 和 μ 都是可观测量, 从而就可求得星流的距离. 这种方法适用于移动星团, 例如金牛座内的毕星团, 它的 100 个成员星至太阳的平均距离约为 50pc. (2) 对于不具有总

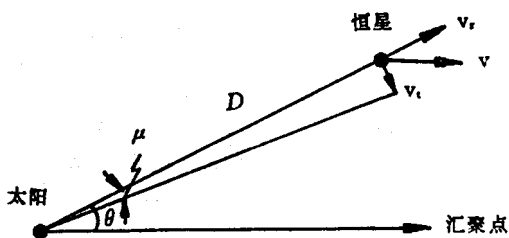


图 2 自行距离的测定

体运动的星群, 由于速度是随机取向的, 因此可有 $\langle |v_r| \rangle = \langle |v_t| \rangle$, 从而求得其平均距离*:

$$D_i = p_i^{-1} = \langle |v_r| \rangle / 4.74 \langle |\mu| \rangle, \quad (1-7)$$

这里的“ $\langle \rangle$ ”表示对整个星群的平均, 而“ $| \ |$ ”表示绝对值, p_i 称统计视差. 如果计入太阳的空间速度 $v_\odot$, 则上式应为

$$D_i = \langle |v_r + v_\odot \cos \lambda| \rangle / 4.74 \langle |\mu| \rangle, \quad (1-8)$$

式中 λ 为恒星与太阳运动向点间的角度. 这种统计视差法能够在 500pc 内精确地测出星群或星团的距离, 但还没有超出银河系的范围. 实际的星团一般处于这两种极端之间, 其中有某些随机运动, 而星团的质心又相对于太阳运动.

光度距离与距离模数 设恒星或星系的光度(即辐射发射的总功率)为 L , 则从地球观测到的视亮度(亦称亮度, 指能通量, 即通过单位面积的辐射功率) l 为

$$l = L / 4\pi D_L^2. \quad (1-9)$$

因此, 只要作为辐射源的天体的光度 L 为已知, 我们就能够通过亮度 l 的测定求得该天体的所谓光度距离 D_L 来, 即

$$D_L = (L / 4\pi l)^{1/2}. \quad (1-10)$$

事实上, 天文学家并不直接采用天体的亮度, 而是使用一种叫

* 若取 $\langle 2v_t^2 \rangle = \langle v_t^2 \rangle = 4.74^2 D_i^2 \langle \mu^2 \rangle$, 则式(1-7)改取形式: $D_i^2 = \langle 2v_t^2 \rangle / 4.74^2 \langle \mu^2 \rangle$.