

宇宙学的现状

—— 进展、问题和展望

俞 允 强

(北京大学物理系 北京 100871)

摘 要

在 Friedmann 建立膨胀宇宙模型和 Hubble 发现膨胀迹象后, 宇宙均匀性的假设得到证实是最重要的进展。但是此后, 由于 Hubble 常数、宇宙密度和真空能密度未被可靠地确定, 宇宙理论尚难以有认真的定量检验。近两年里, 这些基本参量的测定有了突破性的进展。它标志着宇宙学理论将在今后一二十年内走向成熟。

关键词 宇宙学 — 真空能密度 — 宇宙密度

分类号 P157

宇宙学在 20 世纪的最后 30 余年里取得了异常重大的进展。理论框架已无可置疑地确立了。这是事情的一面。另一面是绝大多数宇宙学基本问题依然没有解决, 理论尚不能作出确切的定量预言。宇宙学的状况一直是由这貌似冲突的两个侧面组成的。造成该局面的起因主要来自观测方面。然而观测宇宙学在近两年里出现了突破性的进展。

1 宇宙模型的前提

现今的宇宙理论是以 20 世纪 20 年代 Friedmann 建立的膨胀宇宙模型为基础的。该模型包含有两个基本假设: 首先是假定了宇宙介质是均匀和各向同性的, 它现被称为宇宙学原理; 其次是假定宇宙的动力学行为服从广义相对论。这两条假定举足轻重。有了它, 宇宙的行为作为逻辑推论就都确定了。因此这两条假定本身是否正确是宇宙学的根本问题。

宇宙学原理最初是 Einstein 提出的。当时 (1917 年) 尚完全没有事实基础。后人把它作为方便而可行的工作前提沿用了下来, 直至背景辐射的发现 (1965 年)。它的系统的观测基础是在近 30 年中才获得的。

国家攀登计划资助项目 973 计划资助项目

2001-01-03 收到

观测对宇宙学原理的证实包含两个层次。先是有了宇观尺度的观测，使人们知道宇宙介质可看成以星系为分子的气体。这气体在中小尺度上有明显的结团性。然后是在有大范围的三维巡天资料后，统计表明，以越大的尺度为单元，这气体偏离均匀的程度越低。除此之外，微波背景的观测显示，年龄为 10^5yr 时的宇宙是高度均匀的。偏离均匀的程度仅为 10^{-3} 。这类观测结果充分地证实了宇宙学原理是真实宇宙的好的近似写照。

广义相对论是一般的引力理论。如所周知，它在后牛顿近似领域有强烈的观测证据。它的特征性预言是关于高致密天体和引力波的。长期以来没有这方面的实践证据。因此用广义相对论作为研究宇宙的出发点是自然而合理的，但是并非无可置疑的。无论如何，近 20 年里黑洞和引力辐射的观测研究都强烈地支持广义相对论。

广义相对论的引力场方程本身尚有一个不确定因素。那就是宇宙常数是否为零。这是一个只有通过宇宙学观测才能回答的问题。因此不仅宇宙学需要广义相对论做基础，反过来，后者也需要前者来确定引力方程中的参量。

2 模型的检验问题

上述两个前提把宇宙的动力学方程完全确定了。它们是

$$\ddot{R}^2 + k = (8\pi G/3)\rho R^2 + (\lambda/3)R^2.$$

$$d(\rho R^3) = -pd(R^3)$$

前者被称为(推广的)Friedmann 方程，后者相当于物质的守恒方程。在实物为主的后期，宇宙密度满足 $\rho R^3 = \text{const.}$ ，而在辐射为主的早期有 $\rho R^4 = \text{const.}$ 。这样我们就有一组求解运动的完备方程组了。

为了把宇宙的动力学过程确定地解出，必须输入两个由观测定出的“初”条件。人们要研究的是宇宙过去的演化，但却常以今天为“初”。那么需要的是今天的 Hubble 常数值 H_0 和宇宙密度 $\Omega_0 \equiv \rho/\rho_c$ ，其中 $\rho_c \equiv 3H_0^2/8\pi G$ 。它们实际上是终条件，但是在动力学上与初条件是等价的。连同宇宙常数 $\Omega_\lambda \equiv \lambda/3H_0^2$ ，一共有三个参量需要事先由观测提供，理论模型才能有定量的预言。

在理论前提有了有力的证据后，宇宙模型开始得到了学术界的普遍接受。但是对模型预言进行检验依然是必需的。可是长期来由于三个输入参量的确定度很低，理论模型得到检验和证实的程度也是很初步的。这正是宇宙学尚未能发展成熟的基本原因。

首先是宇宙常数问题。理论家倾向于它是零。在实测上未发现它不为零的证据前，只知道 $\Omega_\lambda < 0.9$ 。人们假定它为零。这样的模型被称为标准模型。标准模型需要输入 H_0 和 Ω_0 。 H_0 的实测值为 $h = 0.4 \sim 1.0$ ，其中 $H_0 = 100h \text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。到 90 年代，专家们相信 $h = 0.6 \sim 0.8$ 。人们对宇宙密度知道得更不确切。从星系团尺度上的局域测量得到 $\Omega_0 = 0.2 \pm 0.1$ ，但是有证据表明未被测到的暗物质可能是它的若干倍。于是能肯定的结果是 $\Omega_0 \geq 0.2$ 。易于想象，相对于这样的输入数据，模型的任何定量预言只能

对应于一个较宽的范围。然而应该肯定, 各方面的事实都没有与标准模型出现明显的冲突。当然, 依此为由认为标准模型已得到证实尚为时过早。

在最近两年多的时间里, 参量的确定有了巨大的进步。1998年, 用 Ia 型超新星测距, 使红移—距离关系较可靠地延伸到了 $z = 0.4 \sim 0.9$ 。重要的是这测量第一次给出了宇宙常数大于零的结果^[1](在 65% 的置信度上排除等于零的可能)。若接受暴胀理论关于 $\Omega_\lambda + \Omega_0 = 1$ 的预言, 由这测量定出 $\Omega_\lambda = 0.65 \pm 0.05$ 和 $\Omega_0 = 0.35 \pm 0.05$ 。随后在 2000 年, 一个叫 Boomerang 的气球观测计划, 借助对微波背景上的扰动谱的测量, 定出 $\Omega_\lambda + \Omega_0 = 1.07 \pm 0.06$ ^[2]。这些进展均是突破性的。

先讨论均匀宇宙模型的检验问题。如已指出, 要能够认真检验须先掌握一组有一定精度的输入参量值。如果今后的观测证实上面的结果可靠, 那么人们才有认真检验的可能。这意义当然很大。模型可以检验的方面很多。特别值得提到的是年龄问题。

如所周知, 实测到的球状星团的年龄值弥散在 12~18Gyr 之间。在 1998 年前, 大部分理论家倾向接受 $\Omega_\lambda = 0$ 的标准模型, 并相信暴胀理论预言的 $\Omega_0 = 1$ 。这模型预言的宇宙年龄为 $6.5h^{-1}\text{Gyr}$, 即大致在 7~13Gyr 之间。在输入参量尚很不确定的条件下, 人们自然只能认为这理论预言与事实是相洽的。这里值得注意, h 必须很接近于 0.5, 并且球状星团年龄很接近弥散范围的低值, 两者才能相符^[3]。事情的发展很具戏剧性。20 世纪 90 年代在 Hubble 常数测定上的进展并没有出现 h 会接近 0.5 的迹象。反之它使专家们感到最终的 h 值会在 0.6~0.7 之间。这样在年龄问题上, 标准模型潜在地有着与事实矛盾的可能。

1998 年以后在确定宇宙整体参量上的进展令理论家感到意外。一方面是真空能不为零会给物理学带来很大困难。另一方面是宇宙密度取临界值又是理论家期盼的。我们不详细讨论这些问题。我们接受 $\Omega_\lambda + \Omega_0 = 1$, $\Omega_\lambda = 0.65$ 和 $h = 0.6 \sim 0.7$, 那么理论的宇宙年龄为 $(14 \pm 2)\text{Gyr}$ 。它与球状星团的年龄确有更好的符合。这表明年龄问题是支持真空(即宇宙常数)为主的。

当然, 近年测定的参量值还有待确证。重要的是: 如果三个输入参量能可靠地确定下来, 而进一步的检验又表明事实与模型相合, 这将是宇宙学走向成熟的标志。

3 结构形成问题

均匀的宇宙模型终究只是真实宇宙的零级近似。今天的宇宙物质具有层次性的结构也是基本事实。宇宙学理论有责任对此做出解释。这就是结构的形成问题。

人们在 20 世纪 70 年代初就意识到, 若今天宇宙中的实物主要是由重子组成的普通物质, 那么星系至今尚来不及形成。到 80 年代初, 由于中微子质量的错误测定, 出现了认为宇宙以中微子为主的局面。这对宇宙学家有很大启发。非重子物质是宇宙中的主要组分的概念使结构形成的研究走上了正路。

在理论上, 这问题是扰动演化的初值问题。当事先知道介质的平均密度和主要组分, 就能把扰动演化的动力学方程确定下来。此外加上扰动的初条件, 我们就能用数学方法算出结构的形成过程和今天宇宙的真实面貌。但是实际上这样做困难很多。首先困

难的是我们既不知道宇宙的密度,也不知道哪些是其主要组分,各占多大的百分比。近 20 年的实际研究是以猜测性的选择为前提进行的。取得巨大的进展。

80 年代主要研究的是热暗物质为主或冷暗物质为主的模型。概括地说,热暗物质为主的模型所演化出的大尺度结构与实际接近,而在星系和星系团尺度上的结果不好;冷暗物质为主的模型则相反,中小尺度上与实际符合得很好,而在大尺度演化上显得不成熟。大量的研究使人们获得一个感觉:为形成真实的结构,非重子为主是必须的,但是不管以热或冷暗物质为主,模型还不是真实宇宙的好的写照。

90 年代中期,人们研究了三重混合的模型。热暗物质或真空占最大的比例(例如 70%),冷暗物质占其次(例如 25%),余下的是重子物质。数值模拟表明,真空为主的高密度($\Omega_\lambda + \Omega_0 = 1$)模型能较好地与真实结构相符。这样对结构形成的了解又前进了一步,但是这模型的前提却还完全没有观测基础。观测既没有证实真空有能量,也没有证实冷暗物质确实存在。连 $\Omega_\lambda + \Omega_0 = 1$ 也只是理论家的猜想,而没有直接证据。

结构形成问题在这次会议上另有专题报告。这里只想指出,从这一角度也看出近年对宇宙学参量的测定结果意义很大。它证实了 Ω_λ 和 Ω_0 的实际取值与结构形成的需要是一致的。这为猜测性的研究奠定了坚实的基础。

4 小结和展望

现今宇宙学的基础完全是由 Friedmann 的膨胀宇宙模型(1923)和 Hubble 发现膨胀现象(1929)奠定的。但是宇宙学理论却长期得不到学术界的接受,并曾被斥之为伪科学。在诸多原因中,宇宙学原理缺乏观测证据是最核心的一个,因为它是理论的基本前提。

背景辐射发现(1965)以来,宇宙学原理陆续在不同深度上得到证实。这是宇宙学赢得人们信任的基础。但是它远不足以作为理论成熟的标志。一个成熟的理论必须能对现象提出可靠的定量预言。如前面已讨论过,要做到这一步,首先需要能可靠地测定 Hubble 常数、宇宙密度和真空能密度。这并不是容易的任务。从这意义上看,近年对 Ω_λ 和 Ω_0 的初步确定是一个新的里程碑。

当然今天不能也不需要把已有的测量结果看成最终的。重要的是这些参量必将很快被可靠地确定,然后理论预言才能在合理的精度下作检验。上面已就宇宙年龄和结构形成两问题说明,事实是支持新近测定的结果的。这些是宇宙学正在很快走向成熟的迹象。

上面提到的气球观测计划 Boomerang 仅是两个更大的卫星观测计划的预演。它们一个叫 MAP(2001 年发射),另一个叫 Planck 巡天器(2008 年发射)。这两个卫星将细致地测定微波背景上的温度起伏谱。如果任务能按计划完成,它一方面能更可靠地把宇宙学参量确定下来,另一方面将为结构形成提供扰动的初条件。这样,不仅均匀的宇宙模型完全落实,而且结构形成问题也同时得到了落实。

宇宙学的成熟当然不是宇宙学的终结。需要解决的问题依然很多,但是问题的性质不同了。在其发展的青年期,宇宙学主要是依靠物理规律和天文事实来确立自己的

理论，而很少能对它们起促进性的反作用。成熟后的宇宙学将更多地与物理学和天文学相互推动。

暴胀是否真发生过？非重子暗物质是否真存在？这些既是宇宙学问题，也同时是未知的物理问题。两方面将只能相辅相成地发展。能由宇宙学向物理学提出深刻的问题，并为解决问题提供启示，这将是成熟后的宇宙学发挥作用的方式。

与天文学的关系也类似。成熟的宇宙学将不仅依靠天文学，也将对天文的研究方向提供启示。例如宇宙学应能指出最早的星系是何时形成的。这将对如何寻找原初星系提供启示。星系团是否是维里平衡系统？这样的问题也能从宇宙学获得启示。

就像一个人走向壮年将有更多的事需要做和能够做一样，一个学科走向成熟，它也将有更多的作用能够发挥。宇宙学将在不久的将来走向成熟，让我们有更好的思想准备来迎接它的壮年期的到来。

参 考 文 献

- 1 Perlmutter S *et al.* astro-ph/9812133
- 2 de Bernardis P *et al.* astro-ph/0011469
- 3 Yu Y, Chen S, Ma E. *Astrophys. Rep.*, 1997, Special Issue, No.2: 70

The Status of Big Bang Cosmology

Yu Yunqiang

(*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract

The confirmation of the uniformity of Universe is the most fundamental progress in the cosmology in recent 30 years. The further crucial task is to fix the input parameters of the model. Those are the Hubble constant, cosmic density and cosmological constant. Before that, the model cannot be convincingly verified. In recent two years, the measure of those parameters have had new progress. It indicates that the cosmology is going to be matured within 10 or 20 years.

Key words cosmology—cosmic density—cosmological constant