

# 标准宇宙模型的观测证据\*

卞毓麟

(中国科学院北京天文台)

## 提 要

标准宇宙模型是指宇宙始于极端高温高密状态的热大爆炸理论。80年代后期以来,面对观测宇宙学方面一系列始料未及而一时难以解释的新发现,有人认为标准模型业已死亡,有人则认为作出这种论断为时尚早,该模型的坚定拥护者则认为已有足够的观测和实验证据以支持这一理论,而无过硬的证据可驳倒它。

本文旨在简介标准宇宙模型的观测证据,主要涉及宇宙背景辐射、轻元素丰度和中微子的代数、河外天体红移的本原、星系和类星体的演化、星系起源和时标问题等等。

## 一、引 言

宇宙始于极端高温高密状态的热大爆炸理论,因成功地解释了诸多重要观测事实而被称为“标准宇宙模型”。80年代后期以来,观测宇宙学的迅速进展却使它面对一系列始料未及的新发现而经受着新的考验。一些原本就不赞成该模型的宇宙学家又对它提出了全面的批评。对此,笔者在“非标准宇宙模型新动向”<sup>[1]</sup>一文中已作了简介。

任何一种宇宙模型在理论上是否坚挺,皆依赖于与观测的对证。困难的是,当同时出现有利和不利于某一理论的证据时,往往很难立即对它们作出中肯的估价,而且对某些观测结果的解释又不易判然消除两义或多义性。就标准模型而言,近年来便出现了这样的局面:少数人宣称标准模型已然死亡(例如[2, 3]),另一些人则认为作出这种论断至少是为时尚早;该模型更坚定的维护者则认为:“观测和实验的进展业已给出足够的证据以支持大爆炸,却没有一项证据令人信服地反驳它”<sup>[4]</sup>。

文[1]侧重介绍了 Arp 等人<sup>[2]</sup>对标准模型的批评和对替代理论的见解。80年代以来,对标准模型持异议的主要文献尚有[3, 5, 6, 7, 8, 9]等。本文的主旨则在于简介迄1991年止,有利于标准模型的一些主要观测证据。为此,本文第二部分先对标准模型作一简要回顾,第三部分简介宇宙背景辐射,第四部分讨论轻元素丰度与中微子的代数,第五部分专谈红移本原问题,第六部分讨论星系和类星体的演化,第七部分讨论星系起源和时标问题,第八部分以“讨论和结语”结束全文。不同作者对同一些观测结果的解释可能会有很大的出入,所以将本文与文[1]相对照或许是相当有趣的,且从中更可窥见某些问题的复杂性。

\*国家自然科学基金资助项目。  
1992年3月24日收到。

## 二、标准模型概述

Weinberg 在其名著《最初三分钟》<sup>[10]</sup>的序言中说过：“幸亏宇宙学中最重要计算都相当简单，只在某些地方才用更精致的广义相对论或核物理学”，这种情况使我们有可能用一些简洁的公式近似勾画出标准模型的实质，它对本评述而言已然足够。

首先，宇宙的膨胀满足哈勃定律：

$$v = H_0 r \quad (1)$$

当星系的退行速度  $v$  可与光速  $c$  比拟时，(1)式需作相对论性改正。现时的哈勃常数值  $H_0$  介乎  $50-100 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  之间。(1)式可等价地表为

$$z = \frac{H_0}{c} r \quad (2)$$

式中  $c$  是光速， $z$  是红移，后者可用以表征膨胀宇宙中的时刻。当  $z$  小于某个临界值时，由宇宙中的重子数守恒可知时刻  $z$  的平均重子数密度为

$$n(z) = n_0(1+z)^3 \quad (3)$$

此处  $n_0$  是现时的  $n$  值。在标准模型中，随着宇宙的膨胀，单位体积内的宇宙背景辐射光子数亦按(3)式那样下降，背景辐射的波长则按  $(1+z)^{-1}$  的规律变化。在任何时刻，宇宙背景辐射均保持黑体谱，其温度则为

$$T(z) = T_0(1+z) \quad (4)$$

式中  $T_0 = 2.736 \pm 0.017 \text{ K}$ <sup>[11,12]</sup> 是现时的  $T$  值。第四节中将阐明对(3)和(4)式的检验已达到  $z \approx 10^{10}$ 。

定义“哈勃长度”  $L$  为

$$L = c/H_0 \sim 6000 h_{50}^{-1} \cdot \text{Mpc} \quad (5)$$

此处  $h_{50}$  为以  $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  为单位的哈勃常数。标准模型假设，在大到可与  $L$  相比拟的尺度上，宇宙平均说来乃是均匀各向同性的。人们常用一个随机放置的、半径  $r$  的球内所含星系数目  $N$  的均方根涨落  $\delta N/N$  来衡量宇宙趋于均匀的尺度。对于  $r = 40 h_{50}^{-1} \cdot \text{Mpc}$ ，有  $\delta N/N \approx 0.5$ ，且  $\delta N/N$  随  $r$  的增大而减小<sup>[13,14,15]</sup>。

均匀性与哈勃定律的联系在于，在任何星系上的观测者看到的退行规律均为(1)式。及至 80 年代中期，对均匀性和哈勃定律的检验已获得很好的结果，例如见[14, 15, 16, 17]，这是人们赞成标准模型的主要证据之一。以下几节分别讨论有关的其他证据。

## 三、宇宙背景辐射

标准模型认为充满宇宙的背景辐射产生于宇宙的早期，且随宇宙的膨胀而冷却<sup>[18]</sup>。COBE 卫星的测量结果<sup>[11]</sup>证实了在波长约从  $0.5 \text{ mm}$  至约  $30 \text{ cm}$  的波段内，宇宙背景辐射谱与各向同性的热普朗克谱符合极佳。在 COBE 发射后几周内的一项火箭测量亦给出了很相似的结果<sup>[12]</sup>。Wilkinson<sup>[19]</sup>总结了在更长波长上的地面测量结果。它们都表明宇宙背景辐射谱非

常接近于热普朗克函数。

宇宙中物质与辐射退耦后，由于前者比后者更热，所以观测到的宇宙背景辐射谱有可能偏离精确的热谱。然而，由于宇宙背景辐射的能量密度约比物质的热容量大 9 个量级，因而在标准模型框架内很难设想有什么过程能显著地扰乱背景辐射谱。人们曾经认为，在波长短于峰值处的宇宙背景辐射温度有可能较前述  $T_0$  值高 10%，然而却始终无法形成既能拟合这种过剩、又能满足其他已有限制条件的可信赖的理论。对此，Peebles 等人强调指出：假定宇宙背景辐射的有效温度约为前述的  $T_0$  值，则“标准模型便断言其谱必定非常接近于热谱，而观测结果正是如此”<sup>[4]</sup>。

宇宙背景辐射的发现及其热谱的验证，历来被视为证实了标准模型的一项重要预言，从而被视为该理论的一大支柱。因此，在 Arp 等人<sup>[4]</sup>详细讨论了背景辐射的另一类截然不同的可能起因之后(见[1])，Peebles 等人<sup>[4]</sup>再度作了这样的评论：“如今宇宙背景辐射的热谱已经如此为人们所熟知，以至于我们可能忘记了标准模型的预言是何等地具体，以及其实验之成功又是何等地显赫。仅仅带有一个可调参数<sup>\*</sup>，这项预言便能与图 1<sup>\*\*</sup>中的独立测量序列以及更长波长处的资料相符。”

#### 四、轻元素丰度和中微子代数

在标准模型中，在宇宙早期的热密状态下，一系列的热核反应确立了有关轻元素的相对丰度，具体的丰度值则依赖于诸宇宙学参数。已知现时的温度值  $T_0$ ，并假定一个现时的物质

密度，宇宙的热史便随之确定，包括整个核综合时期的密度、温度和膨胀速率。在物质分布均匀，且轻子数可与重子数相比拟的标准计算中，所得的轻元素丰度与观测结果符合极佳，这是标准模型的又一重要成就。早先 Peebles 在《物理宇宙学》<sup>[20]</sup>一书中已对此作了系统论述，近年来的文献有 [21, 22, 23, 24, 25] 等。

图 1 给出标准模型预言的轻元素丰度，计算中的自由参数是现时的物质密度，它既可表示为重子数与光子数之比  $\eta$ ，亦可等价地在假定现时宇宙背景辐射温度取观测值的情况下，表示为重子数密度  $\rho_b$  与临界密度  $\rho_c$  之比  $\Omega_b$ 。图中用虚线画出的竖带是  $\eta$  的容许值范围，即该带中的  $\eta$  值能同时符合将  $^4\text{He}$ 、 $^2\text{H}$ 、 $^3\text{He}$  和  $^7\text{Li}$  诸轻元素的观测丰度外推到不与任何重元素挂钩的原初值。尤其值得注意的是(见[22, 23, 24, 25])， $^4\text{He}$  的原初质量比例是  $0.23 \pm 0.01$ ，以及现时的  $^2\text{H}$  和  $^3\text{He}$  的相对丰度  $^2\text{H}/\text{H} \approx 2 \times 10^{-5}$  和  $^3\text{He}/\text{H} \approx 2 \times 10^{-6}$ 。由于在已知的非宇宙学过程中不能产生数量可观的  $^2\text{H}$ ，故由

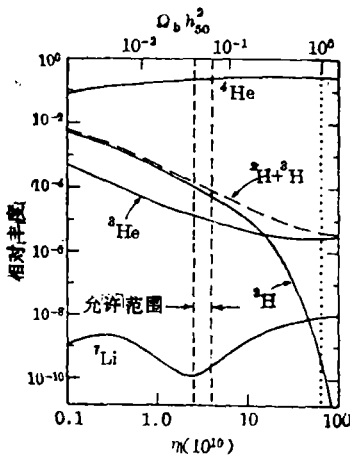


图 1 标准模型预言的轻元素丰度随重子数与光子数  $\eta$  之比的变化，或等价地，随  $\Omega_b$  的变化。除  $^4\text{He}$  给出的是质量分数外，其余元素的相对丰度均以粒子数计<sup>[4]</sup>

\* 此处“可调参数”系指(4)式中的  $T_0$  值。

\*\* 文[4]的图 1 即 COBE 对宇宙背景辐射的测量结果，见[11]。

图 1 可知  $\eta$  不能太大, 否则不足以产生与观测相符的  $^2\text{H}$  丰度, 亦即现时的  $^2\text{H}$  丰度确定了重子密度的上限。反之,  $^3\text{He}$  主要是在恒星中产生的, 原先存在的大量宇宙学  $^2\text{H}$  在恒星中转化为  $^3\text{He}$ , 所以  $\eta$  值不能太小, 否则  $^2\text{H}$  与  $^3\text{He}$  之和就会超过观测值, 亦即  $^2\text{H}$  加上  $^3\text{He}$  确定了重子密度的下限。与这些界限相洽的重子密度容许值尚需满足  $^7\text{Li}$  接近于其产生曲线的极小值(见图 1)。对星族 II 恒星的测量结果  $^7\text{Li}/\text{H} \approx 10^{-10}$ <sup>[26, 27, 28]</sup> 进一步肯定了上述论据。上述诸轻元素的丰度范围从约 24% 直到  $10^{-10}$ , 它们均与重子密度  $\Omega_b = (0.06 \pm 0.02) h_{50}^2$  的宇宙学预言相吻合。该重子密度值正好处在星系明亮部分与大质量暗晕<sup>[23, 25]</sup> 的平均质量密度估值范围内, 更精密的检验则尚有待于进一步确定星系晕暗物质的本质。

可以发问:  $\Omega_b$  可否取其他数值? 有人尝试引入在核综合时期非均匀的重子分布, 然而其结果是对  $\Omega_b$  的限制实质上仍与标准模型中所得的结果相同<sup>[29]</sup>。

除轻元素丰度外, 用高能对撞机进行的中微子代数  $N_\nu$  的测量结果  $N_\nu = 2.98 \pm 0.06$ <sup>[30]</sup> 也对标准模型有利。核综合的论证表明<sup>[20, 31]</sup>,  $^4\text{He}$  的宇宙学丰度定量地与  $N_\nu$  相关。从现有的参数值<sup>[23, 24, 25]</sup> 给出的宇宙学预言是  $N_\nu \leq 3.3$ , 这不仅明确排除了除  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  和  $\nu_\tau$  以外的任何轻中微子, 而且与对撞机的测量相符。

标准模型对轻元素丰度和  $N_\nu$  的预言是非常具体而成功的。在有关的计算中涉及比现时的  $T_0$  要大 10 个量级的宇宙温度, 以及比现时值大上 30 个量级的重子数密度。基于宇宙膨胀所作的这种惊人的外推居然导致如此成功的预言, 乃是对标准模型的又一有力支持。

对标准模型的这项支持一直追溯到中子—质子比达到最终平衡的时期, 相应的红移值  $z \approx 10^{10}$ 。

## 五、红移本原问题

标准模型认为河外天体光谱线的红移源于宇宙膨胀, 故高红移天体必较低红移天体更远。众所周知, 已有大量的观测事实支持这一论断。然而, 持异议者却提出某些河外天体, 特别是类星体, 违背这一关系, 例如见[2, 5]。Peebles 等人<sup>[4]</sup>认为, 如果此类异议不假, 那么它也不一定就否定了标准模型, 因为标准模型并不排除其他种类的物理红移。但是, 这仍有可能对星系红移起因于宇宙膨胀这一至关紧要的解释造成误解和混乱, 因此这个问题相当重要。有关它的历史可参阅[1, 5, 32, 33, 34]等, 此处仅讨论若干要点和突出事例。

Arp 等人<sup>[2]</sup>指出, 在迄今证认的约 4 500 个类星体中, 大约有 20 起这样的成协事例: 在一个高红移类星体周围  $2'$  范围内出现一个亮于 15mag 的低红移星系; 如果这纯属投影巧合, 那么此类事件的期望数就会少于 2。这是主张存在非宇宙学红移的一项重要论据。Peebles 等人<sup>[4]</sup>对此予以反驳: 这 4 500 个类星体囊括了用一切方式(从系统的巡天到纯属偶然地)发现的全部类星体, 若其中有一小部分( $\leq 0.005$ )只是因为它们位于亮星系附近才被发现的(例如在为研究该星系而拍摄的图像中被发现), 那么只要用某种微不足道的选择偏倚便可完全说明上述“成协”效应。由于这里牵涉到经验假设、主观的选择效应、以及巡天中缺乏严格控制等诸多问题, 因此多数天文学家迄今无意认可大的非宇宙学红移。

不仅如此, 文[4]还指出: “在存在相当直接而完整的成协证据的处所, 它不是倾向于

新物理学,而是倾向于对类星体红移作出标准的宇宙学解释。”该文专门对前景星系或星系团造成类星体引力透镜成像作了评述,因为这为高红移类星体肯定位于低红移星系背后提供了实例。

有几个很好的事例为引力透镜模型提供了具体证据。例如,对于类星体 Q0957+561,用甚长基线干涉仪获得的两个像的高角分辨率图所呈现的镜像对称性恰如引力透镜模型之所料<sup>[36]</sup>,且这两个像具有相同的光学与射电流量变化,其时滞亦与透镜成像的几何结构相符<sup>[37,38]</sup>。再如,对于类星体 MG1654+1346( $z=1.74$ ),观测到了由一个  $z=0.254$  的透镜星系造成的 Einstein 环<sup>[39]</sup>,即类星体和星系在视线方向彼此极为靠近、且透镜星系中的质量分布非常接近于轴对称,从而使引力透镜像成为中心位于该星系的一个环。

第三个例子是 Q2237+0305 系统,它曾被 Arp 等人<sup>[2]</sup>作为非宇宙学红移的例证。此例中的星系红移  $z=0.0394$ ,其中心附近的类星体像( $z=1.695$ )具有某种模糊的结构<sup>[40,41,42]</sup>。一个类星体与一个低红移星系如此准确地排成一线的概率是相当小的,不同作者给出的概率估值范围是  $\sim 2 \times 10^{-8}$  到  $\sim 9 \times 10^{-8}$ <sup>[40,43]</sup>,因此 Arp 等人<sup>[2]</sup>认为此例难以用引力透镜来解释。另一方面, Peebles 等人<sup>[4]</sup>则指出:对于这类统计必须持谨慎态度,因为某一特殊的小概率事件有时当真也会发生。既然人们承认星系与类星体的这种排列有可能存在,那就可以认为该系统与预期的透镜成像符合到了很不寻常的地步。哈勃空间望远镜获得的高分辨观测表明,有 4 个未分解开的像迭加在一个普通的棒旋星系上。这些像的间距与假定被观测星系的核具有通常的动力学质量而预期的数值相符,且诸像具有相同的发射线谱。最后,该透镜模型还预言了因透镜星系中恒星的微引力透镜效应造成的诸像的独立流量变化,这也已被观测到(见[44]及其引用的文献)。文[4]指出,若该系统不是一个引力透镜,而是与该星系成协的在物理上分开的 4 个类星体,那么它们与透镜系统(一个透镜星系和位于宇宙学距离上的单一类星体)惊人的相似性便将是一种极不寻常的巧合。

还有许多不那么极端的事例,或许亦可视为引力透镜成像的类星体<sup>[45]</sup>;而且,如果观测到的全部类星体均处于由红移所表征的宇宙学距离上,那么在类星体样本中候选透镜的频数便正好与标准宇宙学所预期的相符<sup>[46]</sup>。

类星体由前景星系以引力透镜效应成像,乃是河外天体红移普遍具有宇宙学本原的证据之一。按 Peebles 等人的说法,由于早在人们知道类星体之前很久,在标准宇宙学模型中就预言了低红移星系会对高红移天体产生引力透镜效应,所以,如果在类星体方面观测不到引力透镜效应,那对标准模型来说就将是一个严重的问题,而肯定的观测结果则是一项重要的成就<sup>[4]</sup>。

## 六、星系和类星体的演化

在标准模型中,相应于红移  $z \approx 0.6-1$  (具体数值取决于宇宙平均质量密度)的宇宙年龄为今日宇宙年龄之半。如今观测到的天体的最大红移值已接近于 5。标准模型预言,在这样大的红移范围内应能观测到星系和类星体性质的显著演化。

此类演化的检验方法之一是星系随红移或视星等的计数。计数结果既取决于宇宙本身的

演化和几何学，又取决于星系自身的演化。例如，若较年轻的星系光度较大，则观测到的极遥远的星系就会比无演化模型预期的数目更多<sup>[15,30]</sup>。实际结果是在多数情况下观测资料与正常星系的适度演化相符<sup>[47]</sup>。同时，对于已记录到的最暗弱的对象而言，观测结果亦已导致如下的看法：它们乃是正经历着星族演化的遥远正常星系<sup>[48]</sup>，这种演化则与这些星系在标准模型中较为年轻正相吻合。简言之，人们相信业已在中等红移范围内( $z \approx 0.5$ )探测到了星系族的某种演化趋势。

对星系团内的星系而言，演化证据似乎更为明朗。对致密富星系团的证认深度几乎已达  $z \approx 1$ <sup>[49]</sup>。 $z \gtrsim 0.3$  的某些富团显示出一族反常地蓝的星系，即所谓的 Butcher-Oemler 效应<sup>[50,51]</sup>；分光研究已证明此类蓝星系确实位于高红移团内而非前景天体，它们似不出现在低红移团内，而且甚至可能在低红移处根本就不出现<sup>[52]</sup>。

强射电星系的证认已达到相当高的红移，故亦甚适合于演化研究。射电星系的光学—红外形态表现出某种随红移变化的显著趋势：对  $z \gtrsim 0.6$  而言，它们变得更为拉长，并向射电像的长轴靠拢，且有证据表明这种延展的光部分地源自那里的恒星<sup>[53]</sup>。对光学上很暗的射电源完备样本的证认为射电星系的红移分布提供了直接的量度，确认了由射电源计数表征的强演化<sup>[54]</sup>。但 Arp 等人<sup>[2]</sup>对此仍甚有异见。

若如本文第五部分所述，类星体和活动星系核等非热河外源的红移确有宇宙学的本原，那么它们就表现出了很强的宇宙学演化。在红移  $z \approx 2-2.5$  处，类星体数目至少为现时的  $10^2$  倍<sup>[55]</sup>。另一方面，亦有证据表明在更高红移处类星体数目重又减少。因此，在宇宙史上似有一个相当明确的“类星体时期”<sup>[56]</sup>。此外，虽然低光度类星体和活动星系核一般说来仅在  $z \lesssim 1$  处可见，但它们也表现出了数目的演化<sup>[57]</sup>。

虽然总的说来有关宇宙学演化的证据多半是定性而非定量的，但作为标准模型的一项检验来说，它仍具有相当的重要性。

## 七、星系起源和时标问题

文[4]的作者们强调指出：“在公众媒介和专业刊物中宣判大爆炸死刑的有关报导，往往将大爆炸模型与诸如现时的平均质量密度之类的自由参数混为一谈。例如，在星系分布方面所观测到的巨大结构，对于星系形成的冷暗物质理论乃是一个严重的问题。但是，只有证明了在相对论性膨胀宇宙模型中不存在其他可能的方式来解释这些结构，它们才会对大爆炸模型本身成为一个问题”，而“我们并不缺乏关于这些结构如何形成的想法”。

在星系形成问题上，近年来流行的冷暗物质理论<sup>[58,59,60]</sup>确实是很吸引人的，其基本假设是：(1) 星系形成的种子源自在所有尺度上均有相同幅度的高斯型原初密度小扰动；(2) 为满足  $\Omega_b \lesssim 0.1$  而  $\Omega_{\text{total}} = 1$  所必须的非重子暗物质在星系形成期运动是很缓慢的(即冷的)。该理论与观测对证所遇到的麻烦<sup>[1,13,61]</sup>不在于暗物质概念本身，而是在于“种子”：与观测对照，此类种子在星系团或更大尺度上形成的结构过于贫乏，集成星系为时过迟，且不能对“巨洞”作出令人信服的解释。问题是：倘若冷暗物质模型最终无法挽救的话，能否在标准大爆炸的框架内找到顺理成章的替代品？

这与宇宙背景辐射的各向同性水平密切相关<sup>[62]</sup>。相应于今天观测到的尺度为 100Mpc 的结构, 拥有冷暗物质的高斯型种子便要求宇宙背景辐射有不小于  $\sim 7 \times 10^{-6}$  的四极各向异性。是否当真存在这一水平的各向异性, 将对冷暗物质模型作出决定性的检验。这尚有待于未来的观测给出答案。

如果冷暗物质模型真的垮台了, 按照文[4]的说法, 至少还有三种替代的办法。首先, 可以抛弃高斯型密度涨落的假设。在由宇宙弦或“纹理”(textures)<sup>[63]</sup>播下结构种子的模型中原初涨落便是高度非高斯型的。这有助于星系形成得较早, 且不在巨洞中形成, 也不会产生对宇宙背景辐射各向异性测量很敏感的过大涨落。第二, 无论是高斯型还是拓扑型(诸如“纹理”之类)的传统的种子形成模型, 均假定种子产生于物质与辐射退耦之前的早期真空相变中。但若相变或产生种子的其他非线性过程发生在退耦之后, 那么它就有可能强烈地扰动质量分布而又不明显地影响宇宙背景辐射<sup>[64]</sup>。为了产生观测到的结构, 上述每一种选择均仍预言  $\delta T/T \gtrsim 10^{-6}$ , 但各向异性则是非高斯型的。第三, 宇宙可具有显著低于 Einstein-de Sitter 情形的质量密度。密度降低使一给定的角度在高红移处所张的线度增大, 这意味着大角尺度上的各向异性测量可能探测到线尺度远大于已获测量结果的结构, 并查明此类结构应为何物。问题在于, 当各向异性测量改善到  $\delta T/T$  小于约  $10^{-6}$  时, 信号将为离散河外射电源、银河系发射、以及星系团内热气体的湍动所左右。Peebles<sup>[65]</sup>指出, 在一个低密度宇宙中, 在  $z \approx 20-30$  处的冷等离子体云中的散射可以抹平  $\sim 1000$ Mpc (这比已观测到的最大结构还要大一个量级)共动长度上的宇宙背景辐射原初涨落。能否解除这种效应的纠缠则是可供日后研究的课题。

考虑到星系形成和宇宙的大尺度结构, 如果当真直到  $\delta T/T < 10^{-6}$  的测量水平上依然看不出宇宙背景辐射的各向异性, 那么人们也许就不得不考虑标准宇宙模型本身(而不仅仅是冷暗物质理论)的前景了。

现在再来考虑时标问题。由现时的哈勃常数  $H_0$  和现时的宇宙年龄  $t_0$  可构成一个无量纲数  $H_0 t_0$ 。对标准热膨胀宇宙模型的一个简单特例 Einstein-de Sitter 模型而言, 与平均质量密度相比, 空间曲率和宇宙常数  $\Lambda$  对膨胀速率的影响均可忽略不计, 此时有  $H_0 t_0 = 2/3$ 。若空间曲率不可忽略, 而宇宙常数  $\Lambda$  仍可忽略, 则  $H_0 t_0 < 1$ 。若  $\Lambda$  甚重要, 则  $H_0 t_0$  可以超过 1。因此, 若以足够高的精度确定了  $H_0$  和最老恒星的年龄(它必不大于  $t_0$ ), 则可对各种宇宙学参数给出极有意义的限定。

van den Bergh<sup>[66]</sup>的评述给出

$$H_0 = 67 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} = (15 \pm 2 \text{ Gyr})^{-1},$$

式中 1Gyr =  $10^9$  年。测量的不确定性主要是系统误差, 其他作者给出的范围是  $H_0^{-1} \approx 10-20$  Gyr。已知最老的球状星团年龄是  $t_{\text{GC}} = 15 \pm 3$  Gyr<sup>[67, 68]</sup>; 独立于星系演化模型的放射性衰变年龄给出  $t_N > 10$  Gyr, 与演化模型相结合则得  $t_0 \approx 15 \pm 4$  Gyr<sup>[67]</sup>。

$H_0 t_{\text{GC}}$  和  $H_0 t_N$  这两个量把  $H_0$  的天文测量结果和恒星演化与重元素产生及衰变的物理学和天体物理学结合了起来。引人注目的是它们的量级均为 1。与此同时, Einstein-de Sitter 模型的  $H_0 t_0 = 2/3$  正好处于上面引用的不确定范围之内。倘若最终查明  $H_0 t_0 > 2/3$ , 则“时标问题”将对该模型变得十分严峻, 但在标准模型的总框架中却仍不难解决, 即它表明了平

均质量密度低于 Einstein-de Sitter 情形。倘若最终查明  $H_0 t_0 > 1$ ，则意味着存在一个正的宇宙学常数。关于时标问题，尚可参阅 Peacock 的近作<sup>[69]</sup>。

## 八、讨论和结语

追本溯源，标准宇宙模型最初的观测依据是 20 年代末隐约看到的星系大尺度分布的均匀性和红移—距离的线性关系。随着观测的不断进展，人们自然会再三发问并作检验：这种模型究竟是否合理？是否需作重大修改？抑或是否必须断然抛弃？在此仅简单讨论如下。

(1) 总的说来，迄今为止标准模型确实经受住了大量的观测检验，支持它的证据尚不啻本文所述。例如仅就类星体红移具有宇宙学起源而言，本文未提及的证据就还有：低红移类星体与红移相近的星系成协；高红移类星体光谱中的重元素吸收系统具有与前景星系相同的红移<sup>[34]</sup>；类星体  $L_\alpha$  线丛的统计性质与视线方向无关，表明这些  $L_\alpha$  吸收线起源于星系际的居间氢云<sup>[70]</sup>等等。因此至今多数宇宙学家仍认为该模型是成功的、合理的。

(2) 与此同时，人们仍可发问：是否存在与标准模型一样好、或甚至比它更好的其他宇宙理论呢？如果别的理论同样能解释现有的观测事实，那么迄今的观测检验便不足以成为宣布标准模型获胜的判据。这方面的争论由来已久，其最典型者便是始于约 40 年前的稳恒态宇宙论与大爆炸理论之争；Arp 等人的文[2]则是近年来宣扬稳恒态、否定大爆炸的代表作。另一方面，Peebles 等人则在文[4]中对除了热大爆炸模型外的其他宇宙学主要流派——作了评点，其中包括稳恒态模型、冷大爆炸模型、等离子体宇宙<sup>[6]</sup>、纯分维（即具有单一维数的）模型<sup>[8]</sup>等；其结论是：迄今尚无任何已提出的其他宇宙学模型能与由观测确立的整套约束相符，因而皆不足以取标准模型而代之。

(3) 标准模型今后仍将继续经受新的观测对证。对此作任何先知型的预言乃是不切实际的。但是，预先设想一下某些未必会出现的结局或许倒是颇有教益的。首先是仍有可能在标准的相对论性膨胀宇宙框架内解决的问题。例如，倘若最终证明  $H_0 > 75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ，那么就得起放弃 Einstein-de Sitter 模型；如果能肯定存在年龄大于 17Gyr 的古老天体，那么也许就得求助于某个宇宙学常数；此类情况都将表明宇宙实际上比人们现时期望的更为复杂。前面提及的星系形成的冷暗物质模型，则是这种类型的另一个例子。

(4) 近年来观测宇宙学的进展相当迅速，始料未及的结果接二连三（例如参见褚耀泉等人<sup>[71]</sup>的评述）。也许，今后还会发生这样的情况：星系深度巡天的结果最终表明在哈勃长度上星系平均空间密度之涨落超过了宇宙背景辐射之各向同性所容许的质量涨落上限  $\delta N/N \sim 10^{-4}$ ，或是发现某个河外天体的  $^4\text{He}$  丰度远小于 0.24，或者大型电子—正电子对撞机实验发现了不少于 5 种的轻中微子，或者发现了一个年龄已达  $10^{11}$  年的星团……。凡此种种，自将使标准模型陷入窘境，那时，人们也许就不得不寻找新的出路了。

Peebles 等人说过：“不会出差错的理论是乏味的”<sup>[4]</sup>，诚哉斯言！

## 参 考 文 献

[1] 卞毓麟，天文学进展，9 (1991)，253.



- [2] Arp, H. C. et al., *Nature*, 346 (1990), 807.
- [3] Maddox, J., *Nature*, 340 (1989), 425.
- [4] Peebles, P. J. E. et al., *Nature*, 352 (1991), 769.
- [5] Arp, H. C., *Quasars, Redshifts and Controversies*, Interstellar Media, Berkeley, (1987).
- [6] Alfvén, H., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 571 (1989), 649.
- [7] Segal, I., *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 83 (1986), 7129.
- [8] Mandelbrot, B. B., *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, (1982).
- [9] Coleman, P. H., Pietronero, L. and Sanders, R. H., *Astron. Astrophys.*, 200 (1988), L32.
- [10] Weinberg, S., *The First Three Minutes*, Basic Books, Ins., Publishers, New York, (1977).
- [11] Mather, J. C. et al., *Ap. J. Lett.*, 354 (1990), L37.
- [12] Gush, H. P., Halpern, M. and Wishnow, E. H., *Phys. Rev. Lett.*, 65 (1990), 537.
- [13] Saunders, W. et al., *Nature*, 349 (1991), 32.
- [14] Clutton-Brock, M. and Peebles, P. J. E., *A. J.*, 86 (1981), 1115.
- [15] Maddox, S. J. et al., *M. N. R. A. S.*, 247 (1990), 1P.
- [16] Sandage, A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 26 (1988), 561.
- [17] Aaronson, M. et al., *Ap. J.*, 302 (1986), 536.
- [18] Mandolesi, N. and Vittorio, N. (eds.), *The Cosmic Microwave Background: 25 Years Later*, Kluwer Academic Publishers, (1990).
- [19] Wilkinson, D., in *Proc. Blois Symp. 25 th Anniv. Discovery of the Microwave Background*, ed. by T. Tran, Frontières, Gif-sur Yvette Cedex, (1991).
- [20] Peebles, P. J. E., in *Physics Cosmology*, Chapt. 8, Princeton Univ. Press, Princeton, (1971).
- [21] Yang, J. et al., *Ap. J.*, 281 (1984), 493.
- [22] Olive, K. A. et al., *Phys. Lett. B*, 236 (1990), 454.
- [23] Schramm, D. N., in *Proc. Nobel Symp. No. 79*, p. 22, (1991).
- [24] Walker, T. P. et al., *Ap. J.*, 376 (1991), 51.
- [25] Pagel, B. E. J., in *Proc. Nobel Symp. No. 79*, p. 7, (1991).
- [26] Spite, F. and Spite, M., *Astron. Astrophys.*, 115 (1982), 357.
- [27] Hobbs, L. M. and Pilachowski, C., *Ap. J.*, 326 (1988), L23.
- [28] Rebolo, R., Molaro, P. and Beckman, J. E., *Astron. Astrophys.*, 192 (1988), 192.
- [29] Kurki-Suonio, H. et al., *Ap. J.*, 353 (1990), 406.
- [30] Phug, K. K. and Yamaguchi, Y. (eds), *Proc. 25th Conf. on High Energy Physics*, (in the press).
- [31] Steigman, G., Schramm, D. N. and Gunn, J., *Phys. Rev. Lett. B*, 66 (1977), 202.
- [32] Field, G. B., Arp, H. and Bahcall, J. N. (eds.), *The Redshift Controversy*, W. A. Benjamin, Inc., Reading, Massachusetts, (1973).
- [33] Swarup, G. and Kapahi, V. K. (eds.), *IAU Symp. No. 119*, (1986).
- [34] 陈建生, 卞毓麟, *自然杂志*, 6 (1983), 597.
- [35] Carilli, C. L., van Gorkom, J. H. and Stocke, J. T., *Nature*, 338 (1989), 134.
- [36] Gorenstein, M. V. et al., *Ap. J.*, 334 (1988), 42.
- [37] Vanderriest, C. et al., *Astron. Astrophys.*, 215 (1989), 1.
- [38] Roberts, D. H. et al., *Nature*, 352 (1991), 43.
- [39] Langston, G. I. et al., *A. J.*, 97 (1989), 1283.
- [40] Huchra, J. et al., *A. J.*, 90 (1986), 691.
- [41] Yee, H. K. C., *A. J.*, 95 (1988), 1331.
- [42] De Robertis, M. M. and Yee, H. K. C., *Ap. J.*, 332 (1988), L49.
- [43] Ostriker, J. P. and Vietri, M., *Nature*, 344 (1990), 45.
- [44] Corrigan, R. T. et al., *A. J.*, 102 (1991), 34.
- [45] Turner, E. L., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 571 (1989), 319.
- [46] Fukugita, M. and Turner, E. L., *M. N. R. A. S.*, 253 (1991), 99.
- [47] Lilly, S. J. et al., *Ap. J.*, 369 (1991), 79.
- [48] Guiderdoni, B. and Rocca-Volmerange, B., *Astron. Astrophys.*, 227 (1990), 362.
- [49] Gunn, J. E., Hoessel, J. G. and Oke, J. B., *Ap. J.*, 306 (1986), 30.
- [50] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Ap. J.*, 219 (1978), 18.
- [51] 潘容士, 赵君亮, 刘汝良, *天文学进展*, 9 (1991), 211.
- [52] Dressler, A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 185.
- [53] Chambers, K. C. and Mc Carthy, P. J., *Ap. J.*, 354 (1990), L9.

- [54] Windhorst, R. A., in *Highlights of Astronomy*, 7, ed. by J.-P. Swings, p. 355, (1986).
- [55] Boyle, B. J., Shanks, T. and Peterson, B. A., *M. N. R. A. S.*, 235 (1988), 935.
- [56] Schmidt, M., Schneider, D. P. and Gunn, J. E., in *Proc. Workshop on Optical Surveys for Quasars*, ed. by P. S. Osmer et al., p. 87, ASP, San Francisco, (1988).
- [57] Maccacaro, T., Gioia, I. M. and Stocke, J. T., *Ap. J.*, 283 (1984), 486.
- [58] Frenk, C. S. et al., *Ap. J.*, 351 (1990), 10.
- [59] 陈 时, 俞允强, 马 骥, *天文学进展*, 6 (1988), 274.
- [60] 马 骥, 俞允强, 陈 时, *天文学进展*, 9 (1988), 285.
- [61] Geller, M. J. and Huchra, J. P., *Science*, 246 (1989), 897.
- [62] Vittorio, N. et al., *Ap. J.*, 372 (1991), L1.
- [63] Gooding, A. K., Spergel, D. N. and Turok, N., *Ap. J.*, 372 (1991), L5.
- [64] Hill, C., Schramm, D. N. and Fry, J. N., *Comments Nucl. Particle Phys.*, 19 (1989), 25.
- [65] Peebles, P. J. E., *Ap. J.*, 315 (1987), L73.
- [66] van den Bergh, S., *Astron. Astrophys. Rev.*, 1 (1989), 111.
- [67] Schramm, D. N., in *Astrophysical Ages and Dating*, ed. by S. Vauclair, J. Audouze, and T. Tran, p. 365, *Frontieres, Gif-sur Yvette Cedex*, (1990).
- [68] Vanden Berg, D. A., Bolte, M. and Stetson, P. B., *A. J.*, 100 (1990), 445.
- [69] Peacock, J., *Nature*, 352 (1991), 378.
- [70] 卞毓麟, *天文学进展*, 3 (1985), 129.
- [71] 褚耀泉, 朱杏芬, *天文学进展*, 9 (1991), 171.

(责任编辑 刘金铭)

## Observational Evidences for the Standard Cosmological Model

Bian Yulin

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences)

### Abstract

The so called "Standard Cosmological Model" means the relativistic Hot Big Bang theory, in which our expanding universe has been evolving from an extremely hot and dense state. Since late 1980s, on the one hand, as having some unexpected facts found in the field of observational cosmology, some authors claime that this model must have died already. On the other hand, among those who disagree with the above statement, some scientists definitely state that advances in observations and experiments have yielded a variety of evidence in support of this model and none convincingly contradict it.

A brief review on observational evidences for the standard cosmological model is presented in this article, in which among the issues discussed are those concerning the cosmic background radiation, light element abundences and neutrino counting, the origin of redshifts of extragalactic objects, the evolution of galaxies and quasars, the origin of galaxies and the timescale problem, etc.

附注：作者读校样时，已获悉 COBE 测得宇宙背景辐射涨落的新结果，可参见 Silk, J., *Nature*, 356(1992), 741.