

第四讲 暴涨宇宙学的研究与进展*

朴云松¹ 张元仲^{2,†}

(1 中国科学院研究生院 北京 100049)

(2 中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

摘要 文章简单介绍了标准(大爆炸)宇宙模型的成功和困难,着重介绍了暴涨宇宙学的研究历史和最近的进展,并展望了今后人们可能的关注方向

关键词 暴涨宇宙学,大爆炸宇宙模型

The inflationary universe

PIAO Yun-Song¹ ZHANG Yuan-Zhong^{2,†}

(1 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract A brief introduction is given to the success and problems of the standard (big bang) model of cosmology. We review the main points of the history and development of the inflation models of the universe. Finally, we mention various research directions which may be of interest in the near future.

Keywords Inflation, Big bang model, universe

宇宙学研究的是我们宇宙的起源与演化.基于爱因斯坦广义相对论的大爆炸宇宙模型(宇宙的标准模型)虽然被许多天文观测所证实,但是也存在很多基本困难.暴涨宇宙模型为解决这些基本困难提供了一种途径.

宇宙模型的研究历史可以追溯到牛顿.1691年,牛顿根据他的万有引力理论提出过一个静态宇宙模型.这个模型的困难在于,在一个有限的空间区域内,恒星之间的相互吸引会使恒星向某中心一起坍塌.为了避免这种不稳定性,牛顿提出在这个区域之外的无限空间内加上足够多(但有限)的其他恒星.然而研究表明,外部的球壳不会影响内部的动力学.因此,牛顿的修正并不能避免不稳定性困难.近代宇宙模型的研究起源于爱因斯坦;1917年,为了使广义相对论给出静态宇宙学解,他引进了一个宇宙常数项.同年,德西特提出了一个完全没有物质存在的静态宇宙模型,可以解释当时观测到的遥远天

体的红移.但是,爱丁顿等人后来证明了静态宇宙是不稳定的.从此,人们开始意识到宇宙可能是随时间变化的.1922年和1924年,俄国科学家Friedmann基于广义相对论研究了膨胀的闭合和开放宇宙模型;1929年,Robertson研究了平坦宇宙模型.同年,哈勃基于对河外星系的观测数据发现了星系的红移(或退行速度)与距离之间成线性关系(即哈勃定律或哈勃关系),表明星系的运动不是随机的,因而彻底否定了静态宇宙模型.从此,膨胀宇宙模型逐渐被人们所接受.

1 标准(大爆炸)宇宙模型的成功和困难

* 国家自然科学基金(批准号:90403032)资助项目;国家重点基础研究发展计划(批准号:2003CB716300)资助项目

2005-05-17收到,2005-5-30修回

† 通讯联系人. Email: yzhang@itp.ac.cn

宇宙学研究的是宇宙大尺度的行为.天文观测表明,虽然宇宙中的天体或星系都是质量集中的区域因而宇宙的小尺度是极不均匀的,但是当我们把直径为几亿光年的区域内的总质量平均分布到整个这个区域的时候,我们会发现,不管这个区域选在宇宙中的哪一部分,我们都会得到大致相同的平均密度.由此,人们假定在大尺度上,宇宙(的平均质量密度)是均匀的和各向同性的,这就是通常说的宇宙学原理.标准宇宙模型的出发点是:把宇宙物质当成理想流体;宇宙学原理要求宇宙物质的质量密度和压强只随时间变化而与空间位置无关.在这样的条件下,爱因斯坦广义相对论给出了三种不同类型的膨胀宇宙:闭宇宙、平坦宇宙、开宇宙;它们的尺度随时间而变化;由于时间有个起点(宇宙的诞生),因而宇宙具有年龄;在时间趋于零时,宇宙的尺度趋于零,宇宙的密度、压强和膨胀速度趋于无穷大.这是一个典型的大爆炸图像.由此,Lemaitre在1932年称这种图像为“Big Bang”(大爆炸);所以,广义相对论给出的这三种类型的宇宙被称为大爆炸宇宙模型,即宇宙标准模型.按照这个模型,我们今天的观测宇宙是从一个极小的火球的大爆炸开始随后不断膨胀而成的.

大爆炸宇宙模型一些重要预言已经被天文观测所证实,例如:(1)哈勃定律.这个定律已被约三万个星系的红移(或退行速度)与距离的关系的观测数据所证实;(2)宇宙年龄.大爆炸模型与天文观测数据相比较给出宇宙今天的年龄约为140亿年.宇宙中的恒星和星系等都是在宇宙诞生以后逐渐形成的,所以它们的年龄必须小于宇宙年龄.星系和恒星的年龄可以用几种不同的方法来确定,例如测量放射性元素及其衰变产物在星体中的丰度.各种方法给出的星系和恒星的年龄大致在几十亿年的量级,这个结果与大爆炸模型给出的140亿年的宇宙年龄是相容的;(3)微波背景辐射.标准宇宙模型预言:今天宇宙中存在着遗留下来的微波辐射背景,它的能谱应当与绝对温度为几度的黑体辐射谱一样.1964年,就在物理学家们计划用辐射计观测这种背景的时候,美国的两位工程师彭齐亚斯和威尔逊在安装调试卫星天线的定标过程中(无意中)发现天空各个不同方向上都存在一种不变的相当于绝对温度3.5K的黑体辐射背景(微波背景辐射).他们因此而荣获1978年的诺贝尔物理学奖.近年,使用1989年升空的宇宙背景探测器测到的微波背景的数据与绝对温度为 $2.726 \pm 0.010\text{K}$ 的黑体辐射谱

极为吻合;(4)大爆炸核合成.标准宇宙模型的最早证据是宇宙中轻元素丰度的观测结果.轻元素是指氦、氦-3、氦-4、锂-7等.按照大爆炸模型,这些轻元素最初(指大爆炸之后的0.02s到3min这个时期)是由中子与质子通过核反应合成并遗留至今的.宇宙中轻元素丰度的观测结果与大爆炸核合成的预言一致.

尽管有了上述的成功,但是大爆炸宇宙模型还存在许多基本困难,主要包括奇性困难、视界困难、平坦性问题、重子数不对称问题、星系形成问题等等;此外,当把粒子的统一理论应用于早期宇宙时又会出现畴壁问题、磁单极问题、固有对称性破坏的问题、时空维数问题以及宇宙常数问题等.限于篇幅,本文不能详细解释所有这些问题及解决它们的各种尝试.我们将只简单说明如下几个最主要的困难及其解决它们的可能的办法.(1)奇性困难.宇宙在诞生时刻其能量密度和温度都趋于无穷大,但是物理上无法接受无穷大的概念.这种奇性问题被看成是广义相对论的固有问题.由此,很多人认为广义相对论只是一个经典理论,它不适用于解释宇宙大爆炸时刻的物理现象.在这样小的尺度上应当用量子态来描写.所以,研究引力场的量子化(量子引力与量子宇宙学)成为一个极为重要的研究课题;由于广义相对论场方程的高度非线性,人们离获得一个满意的量子引力还相差甚远.解决奇性困难的其他尝试也在不断地进行;(2)视界问题.大爆炸宇宙模型预言的宇宙尺度比现在天文观测给出的观测宇宙尺度小很多很多;(3)平坦性问题.大爆炸宇宙模型还预言,宇宙的极早期的质量密度与一个平坦宇宙的质量密度(即宇宙的临界密度)之间的差别出现在小数点后面第几十位上.人们难于找到宇宙如此“精细调节”的谜底,这被称为平坦性困难.研究表明,暴涨宇宙模型可以解决大爆炸宇宙模型的视界困难、平坦性困难及其他大多数困难.

2 暴涨宇宙模型

“暴涨”的研究历史可以追溯到1965年Gliner的图像:宇宙在处于类真空的状态下指数地膨胀大约 e^{70} 倍.同年,Sakharov讨论了暴涨宇宙中质量密度的扰动.但是,暴涨宇宙学在此后的很多年都受到冷落.直到1979年,暴涨宇宙的第一个半现实的方案才由Starobinsky提出来.然而当时并不十分清楚暴涨宇宙的初态是什么.如果宇宙最初处于高温状

态,那么暴涨过程就不会发生.为此,Zeldovich 在 1981 年提出暴涨宇宙“从无”产生.同年,Guth^[1]提出了一种暴涨模型,这是暴涨宇宙学发展过程中的重要一步.他的核心思想就是放弃标准宇宙模型中关于绝热膨胀的假设,认为宇宙在极早期经历的高速膨胀(暴涨)过程使宇宙的总熵增加了 Z^3 倍,其中 Z 是个大数.例如,如果开始暴涨时的温度为 10^{20} K(此时宇宙年龄约为 10^{-40} s),那么 $Z \geq 10^{28}$.这样,就可以同时解决上面的视界困难和平坦性困难.Guth 的模型称为旧暴涨模型,它的主要困难在于:要么暴涨不能开始,要么开始之后永不终结.1982 年,Linde 等人^[2]对 Guth 的模型做了改进:认为宇宙极早期处于 SU(5) 大统一理论的基态,随着温度下降而产生对称性的自发破缺(宇宙发生从高温相到低温相的相变)这个模型称为新暴涨宇宙模型.新模型虽然解决了宇宙均匀和各向同性问题以及暴涨的终结问题,但是它又有自身的不足:难于给出形成星系所必需的质量密度的扰动等等.1983 年 Linde 又提出了混沌(chaic)暴涨模型^[3],通过一个具有平方势的标量场的暴涨,宇宙可以从势的较高处慢慢滚到较低处.混沌暴涨模型的优点在于它在某种程度上抛弃了以前模型中引入的“超冷”和“相变”等概念,使模型看起来更加简洁,也为以后的模型构造提供了一个清晰的指导.现在看来,这种观念的转变是非常重要的,同时它也使暴涨成为独立于相变的极早期宇宙的一个重要的理论.上述暴涨模型之间的差别在于在爱因斯坦广义相对论的框架内选取不同的宇宙物质场(暴涨场)来研究宇宙的快速膨胀.另一种不同类型的尝试是通过修改广义相对论的构架来建立新的模型,使真空泡的成核率与宇宙膨胀率的比值随时间而变化^[4],这种模型称为扩展(extended)暴涨模型.到了 20 世纪 90 年代初,Linde 还提出了杂化(hybrid)暴涨模型^[5].该模型显示,引入一个辅助的标量场也可以得到真空泡成核率与宇宙膨胀率的比值随时间而变化.在接下来的工作中,Linde 抛弃了关于真空泡的成核概念,形成了目前流行的版本:随着暴涨子的演化,与之相耦合的辅助场逐渐成为不稳定的,使宇宙向引力势的极小值滚动而导致暴涨的结束.杂化暴涨模型不仅有更宽的参数空间,而且普遍存在于各种超引力和超弦模型中.更为重要的是它是单标量场暴涨模型分类中最后被发现的一类模型.

事实上从 20 世纪 80 年代到 90 年代,人们从粒子物理的标准模型、超引力和超弦理论出发,构造出

了许许多多的暴涨模型,其中的标量场有效势涉及到初等函数中的 n 次方型、指数型、对数型和三角函数型以及它们的组合.我们在这里没有提及的原因是,所有这些模型依然没有摆脱上述几类暴涨模型限定的框架.这能够从随后几年的单场暴涨模型分类看出来.1997 年,Dodson 等人^[6]在慢滚动参数的基础上,根据张量标量比和标量谱指数两个观测对对各种单场暴涨模型系统地做了分类,并指出新暴涨模型(小场模型)、混沌暴涨模型(大场模型)和混合暴涨模型彻底地覆盖了整个张量标量/标量谱平面,从这种意义上来说,这三类模型差不多涵盖了所有的单场暴涨模型.在这种情况下,不论你选取什么样的有效势,它在张量标量比/标量谱平面中的点一定属于上述三类模型之一.这种分类目前已经被人们广泛采纳.至此人们对单场暴涨模型的理解研究告一段落.

伴随着暴涨模型的发展,原初扰动的理论也在同一时期被逐步建立起来.在暴涨期间,场的量子扰动被拉伸到视界以外凝结.这些超视界的扰动在辐射为主或物质为主时再进入视界,导致了相应尺度上的能量密度的扰动,这就提供了宇宙大尺度结构形成的种子.更重要的是原初扰动在微波背景中留下了可观测的印迹.因此微波背景不均匀性的探测就成为检验和证实暴涨模型的重要手段.

在新暴涨模型提出后不久,Bardeen,Steinhardt 和 Turner^[7]指出,在超视界尺度上共动的曲率扰动近似是个常数,这使人们能够通过计算暴涨期间的出视界扰动幅度来估算进视界的扰动量.一般地说,原初扰动的幅度正比于暴涨时期的 Hubble 参数,反比于标量场的滚动速度,其功率谱是绝热的和近标度不变的,在统计上满足 Gauss 分布.这些特点是暴涨理论不依赖于模型的一般预言.同期,Guth 和 Pi 以及 Starobinsky, Hawking 等人也都对原初扰动做了相关研究.规范不变的宇宙学扰动理论的研究始于 20 世纪 80 年代初.1992 年,Mukhanov, Feldman 和 Brandenberger^[8]系统地阐述了宇宙学扰动理论及其演化.1993 年,Stewart 和 Lyth^[9]使用慢滚动参数,对标量和张量扰动谱进行标准化计算.他们的论文至今仍然成为计算扰动谱的教科书.1996 年,Sasaki 和 Stewart^[10]给出了一个在多场条件下计算绝热扰动的公式.但是对于多个场同时驱动暴涨的情况,事情并非那么简单.由于不同成分的扰动演化并不等同,这将产生一个净的非绝热扰动,一般会成为等曲率扰动(在单场模型中也存在着非绝热的压强扰

动,但在大尺度上是被压低的)。这个现象在 20 世纪 90 年代中期以前已经被许多人在一些双场模型中注意到,但是一直没有找到系统的公式来计算一般情况下的等曲率扰动。2000 年, Gordon 等人^[11]提出了一种计算多场暴涨模型中的绝热扰动和等曲率扰动的普适方法。他们把场扰动分解为平行于场空间背景轨道的扰动(绝热)和垂直于轨道的扰动(等曲率),这样就使两种不同的扰动被分离出来满足各自不同的方程,使人们能够通过一些近似的解析和数值解来得到它们各自的演化图像。进一步的研究表明,绝热扰动和等曲率扰动可以相互关联而导致许多有趣的观测结果。如果假设绝热条件成立,即不同场的扰动演化是全同的,那么等曲率扰动就能被忽略,仅仅剩下绝热扰动。事实上,20 世纪 90 年代末多标量场暴涨模型已经开始引起人们的广泛关注,这不仅是因为多标量场很自然地出现在许多高能物理理论中,诸如弦/M 理论中,而且更重要的是,多场模型中的参数不需要有大的精细调节,即使每个场不满足慢滚动条件,多场的辅助效应也将使场慢滚动,在场的数量很多的情况下更是如此。1998 年, Liddle 等人^[12]最先在指数势的情况下分析了多场暴涨模型,并讨论了多场暴涨的辅助性质。接着我们进一步研究了具有不同指数势的多场暴涨模型及其标度解,并分析了这些解的稳定性^[13]。现实的多场演化及扰动计算相当复杂,因此目前很难有一个类似于单场模型分类。除了上述通过背景场来产生扰动的方法外,近年来人们也提出了一些由非背景场导致的原初扰动产生机制。例如,2003 年 Dvali 等人^[14]和 Kofman^[15]各自独立地提出了不均匀的重加热机制,即在暴涨结束后暴涨子衰变为普通的粒子并加热宇宙;这种机制是通过非背景场来产生扰动的,因此有着更加广泛的应用。

3 暴涨宇宙学的新进展

暴涨宇宙模型在现代宇宙学的研究中扮演着非常重要的角色。它不但能使标准大爆炸宇宙模型存在的诸多问题得以解决,同时暴涨时期产生的量子涨落被拉伸到视界以外形成了原初扰动,因而为宇宙结构的形成提供了来源。近年来的天文观测数据,特别是 Wilkinson 微波各向异性探测器(WMAP)探测到的大角度微波背景温度-极化反关联,极大地支持并促进了暴涨宇宙学的理论研究。

近年来一些具有特殊动力学项的标量场暴涨模

型成为了研究热点。事实上,上世纪 90 年代末非正则动力学项的暴涨模型就被研究过,因为它在一些高能物理理论中能够出现。另一个更为重要的原因是人们对于正则动力学项的单场暴涨模型的理解已经趋于完善,因而需要把注意力放在其他一些新的方向上;从单场走向多场,从正则动力学走向非正则动力学成为必然;而且,这对于丰富暴涨模型、深化暴涨理论的理解也是非常重要的。例如,1999 年的 k 场暴涨模型^[16]就包含由弦理论的高阶修正导致的一个非正则动力学项。虽然在其后的几年中很少有人再继续研究这类暴涨模型,但是由于近年来理论和观测的需要,k 场的一些特殊形式如快子和鬼场(phantom)则引起了许多人的很大兴趣。但在快子暴涨模型中,慢滚动条件和观测的扰动幅度不能被同时满足。为了克服这个困难,我们提出了多快子暴涨模型^[17],这个工作为建立在弦理论多 D 膜上的宇宙学图像的研究提供了有意义的尝试,因而促进了这一方向上的许多相关研究。快子宇宙学在此后两三年的迅速发展,成为弦理论和宇宙学交叉的一个热点方向。鬼场是不同于通常物质的反常物质场。1999 年, Caldwell^[18]已经指出,把鬼场当作宇宙中的暗能量并不与当前的天文观测装置 SNeIa 和 CMB 的观测数据相矛盾,但是当时并没有引起人们的重视,他的论文直到 2002 年才被专业刊物接受。不过随着观测的进一步发展,人们逐渐意识到鬼场也是一种解释宇宙晚期演化的候选者,由此才引起人们的广泛关注。由于鬼场能够使宇宙晚期的演化出现一段时期的超加速膨胀(它类似于极早期宇宙暴涨),因而基于鬼场为主的解是宇宙演化的吸引解这一事实,2004 年我们首次提出了鬼场暴涨模型^[19]。进一步的研究表明,鬼场暴涨与正则标量场暴涨及循环模型之间呈现着特殊的对偶关系,这为我们重新审视极早期宇宙的演化提供了独特的视角^[20]。由于鬼场违反能量条件,所以以它为主的宇宙将不可避免地演化到“Big Rip(大撕裂)”,这是一种不同于大塌缩的宇宙学奇异性;研究表明,鬼场与其他物质场的耦合可以避免这种困难^[21]。从量子场论的观点来看,尽管鬼场存在一些诸如量子不稳定性等问题,但是不管怎样,如果鬼场被以后的观测证实的话,那将是对现有理论的一个冲击。

除了模型本身的发展之外,近年来天文观测精度的提高,特别是天文观测装置 WMAP 对宇宙学参数的精确测量^[22],也带来了暴涨理论的新的挑战。WMAP 的重要结果之一是微波背景角功率谱在

大角度上的反常压低,这与通常的暴涨模型所预言的近标度不变的平坦谱不同.尽管这需要进一步的观测证实,但是依然引起了广泛的关注.为了解决这种反常,人们提出了许多不同的方案.其中,国内的一些研究者提出了双暴涨场^[23]和非对易空时暴涨模型^[24].事实上,从原初功率谱的角度看,最好的解决方法是在大尺度上功率谱有一个截断(cutoff).为此,我们提出了一个新模型^[25],其中宇宙先收缩然后暴涨,而在收缩相中产生的强蓝谱能够很自然地提供必要的截断.更为有趣的是,我们把大尺度功率谱的压低与宇宙的反弹(避免大爆炸奇异性)联系在一起,这为循环宇宙图像提供了一个可能的支持.当然,上述理论解释还需要观测的进一步证实,因此未来几年内,WMAP数据的再发布必将带来新的理论研究热潮.

4 结束语

暴涨宇宙学的研究至今已有 25 年.由于近 10 年的快速发展,暴涨理论已经日趋完善.从单场到多场,从各种不同的有效势到各种不同的动力学项,人们已经基本穷尽了以标量场作为暴涨子的各种可能的模型,同时对原初扰动的理解也已经趋于成熟.目前暴涨理论已经发展成为现代宇宙学的一个重要的重要组成部分,越来越多的人已经意识到,暴涨的理论研究和观测证实不仅对宇宙学而且对整个物理学都会有划时代的意义.因此在今后的几年中,暴涨理论的研究将依然是令世人瞩目的焦点.

未来人们或许会更加关注以下两个方面.首先,人们至今还未找到一个有说服力的高能物理理论的现实模型,在这个模型中应当包含暴涨理论所需要的暴涨场.不过这种状况并不意味着暴涨理论存在缺陷.而恰恰相反,暴涨理论无论是模型本身或扰动,还是重新加热机制,都为高能物理提供了多种可能的选择.事实上人们对一个现实暴涨模型的无奈期待正反映了人们对一个自洽的高能物理框架的无知.面对天文观测和暴涨理论的进一步发展,寻找一个自洽的现实理论模型依然是研究的迫切任务.同时暴涨模型的观测与检验也为研究高能物理提供了一个非常有用的窗口.其次,从观测上说,在未来的几年内,随着 WMAP 数据的不断的再发布及新的 Planck 卫星上天,宇宙学将进入越来越精确的时代.WMAP 和 Planck 的重要目标之一就是进一步检验和证实暴涨理论,特别是未来将更加侧重于极化、高

斯性及其他次级效应的观测,因而相关的理论方法都在发展之中.相对于理论模型的构造,特别是人们面对着各种各样的理论模型的时候,大多数人似乎更加重视用天文观测对理论模型进行检验.此外,目前由于缺乏新的思想而使得新理论模型的构造举步维艰,因此需要新的天文观测来进行进一步的推动.

参 考 文 献

- [1] Guth A H. *Phys. Rev.*, 1981, D23: 347
- [2] Linde A D. *Phys. Lett.*, 1982, B108: 389; Albrecht A, Steinhardt P J. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, 48: 1220
- [3] Linde A D. *Phys. Lett.*, 1983, B129: 177
- [4] La D, Steinhardt P J. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62: 376
- [5] Linde A D. *Phys. Lett.*, 1991, B259: 38; *Phys. Rev.*, 1994, D49: 748
- [6] Dodelson S, Kinney W H, Kolb E W. *Phys. Rev.*, 1997, D56: 3207
- [7] Bardeen J M, Steinhardt P S, Turner M S. *Phys. Rev.*, 1983, D28: 679
- [8] Mukhanov V F, Feldman H A, Brandenberger R H. *Phys. Rept.*, 1992, 215: 203
- [9] Stewart E D, Lyth D H. *Phys. Lett.*, 1993, B302: 171
- [10] Sasaki M, Stewart E D. *Prog. Theor. Phys.*, 1996, 95: 71
- [11] Gordon C, Wands D, Bassett B A *et al.* *Phys. Rev.*, 2001, D63: 023506
- [12] Liddle A R, Mazumdar A, Schunck F E. *Phys. Rev.*, 1998, D58: 061301
- [13] Guo Z K, Piao Y S, Zhang Y Z. *Phys. Lett.*, 2003, B568: 1; Guo Z K, Piao Y S, Cai R G *et al.* *Phys. Lett.*, 2003, B576: 12; Lyth D H, Wands D. *Phys. Lett.*, 2002, B524: 5
- [14] Dvali G, Gruzinov A, Zaldarriaga M. *Phys. Rev.*, 2004, D69: 023505
- [15] Kofman L. *astro-ph/0303614*
- [16] Armendariz-Picon C, Damour T, Mukhanov V. *Phys. Lett.*, 1999, B458: 209
- [17] Piao Y S, Cai R G, Zhang X *et al.* *Phys. Rev.*, 2002, D66: 121301(R)
- [18] Caldwell R R. *Phys. Lett.*, 2002, B545: 23
- [19] Piao Y S, Zhang Y Z. *Phys. Rev. D*, 2004, 70: 063513
- [20] Piao Y S, Zhang Y Z. *Phys. Rev.*, 2004, D70: 043516; Piao Y S. *Phys. Lett.*, 2005, B606: 245
- [21] Guo Z K, Zhang Y Z. *Phys. Rev.*, 2005, D71: 023501; Guo Z K, Cai R G, Zhang Y Z. *astro-ph/0412624*
- [22] Bennett C L *et al.* *astro-ph/0302207*; Spergel D N *et al.* *astro-ph/0302209*
- [23] Feng B, Zhang X. *Phys. Lett.*, 2003, B570: 145
- [24] Huang Q G, Li M. *JCAP*, 2003, 0311: 001
- [25] Piao Y S, Feng B, Zhang X. *Phys. Rev.*, 2004, D69: 103520