

宇宙学常数疑难*

王 伟†

(中国科学院国家天文台 北京 100012)

摘 要 当代天文学的一系列观测事实都支持应该存在一个非零的正的宇宙学常数.但是,人们发现当前宇宙学常数值太小,而且宇宙学常数即真空能量密度与现在的物质密度巧合地具有相同的量级.然而现有物理学理论还无法给出合理的解释,因此宇宙学常数问题成为物理学和天文学上最重大的疑难之一.文章综述了近年来宇宙在加速膨胀这一重大的天文发现和宇宙学常数的观测结果以及当前理论物理学在宇宙学常数问题上的一些尝试.
关键词 宇宙学常数,真空能,量子引力,宇宙学

THE COSMOLOGICAL CONSTANT PROBLEM

WANG Wei†

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract In recent years there have been good reasons to believe that cosmology with a positive cosmological constant is the best fit to observable phenomena in astronomy. The cosmological constant as a measure of the energy density of the vacuum is too small at the particle physics level, but it is comparable to the present matter density. However the small cosmological constant and cosmic coincidence problem cannot be resolved within the known laws of physics, which is the famous cosmological constant problem in physics and astronomy. In this review we first introduce the great progress in observational evidence for the accelerating universe with the positive cosmological constant and discuss a number of approaches to this puzzle, which at this point remains one of the most significant unsolved problems in fundamental physics.

Key words cosmological constant, vacuum energy, quantum gravity, cosmology

1 历史的由来

现代宇宙学起源于1917年,爱因斯坦将广义相对论应用到宇宙学,建立了第一个物理的宇宙模型.爱因斯坦作了两个简化假设(1)宇宙物质在空间上是均匀各向同性的,即宇宙学原理.这个假设与现在的天文观测是符合的(2)宇宙是静态的,这个假设沿用了牛顿时代的观点,但是爱因斯坦的场方程得不到这样的解,便在场方程中引入了著名的宇宙学常数 Λ .同一年,德西特(de Sitter)建立了一个完全不同的静态宇宙模型.模型同样也引入了宇宙学常数,但不包含任何物质.这个模型有一个很有趣的性质:当一个粒子沿着基本世界线运动时,将产生一个引力红移,即著名的德西特效应.

1930年以前,几乎每一个人都相信宇宙是静止的,因此弗里德曼和勒梅特关于宇宙演化的工作并没有引起太大关注.爱因斯坦曾经对弗里德曼的文

章发表过评论,认为这项工作在数学上是正确的,但没有物理意义.直至哈勃在1929年发表了关于遥远星云辐射红移的著名结果,以及勒梅特成功地解释了哈勃的观测结果,才彻底改变了这一领域内主要研究者的观点.爱因斯坦立即承认宇宙学常数项的引入是不必要的,并认为引入宇宙学常数是他一生中所犯的最大的一个错误.但是当时用哈勃常数得到的宇宙年龄比恒星年龄还小,于是有人认为 Λ 应该存在.勒梅特找出所有弗里德曼-勒梅特方程可能的解,建立了一个新的宇宙模型,即所谓的“勒梅特弛豫宇宙”.这个宇宙是封闭的,但存在一个排斥的 Λ 力(Λ 大于零),并且 Λ 值比爱因斯坦起初所取值要稍微大一些.从大爆炸开始, Λ 将经历两个阶段.起初的演化, Λ 力并不重要,由于引力的作用,宇宙减速膨胀并慢慢接近爱因斯坦宇宙.此后,

* 2001-07-13收到初稿,2001-09-06修回

† 通讯联系人. E-mail: wvwang@lamost.bao.ac.cn

斥力的作用将比引力强,开始第二阶段的演化,宇宙加速膨胀.这个模型可以调和宇宙年龄存在矛盾的问题.

20世纪40年代末,伽莫夫开始引申宇宙膨胀的图景,研究宇宙的早期情况.他认为宇宙从密度和温度都很高的状态开始演化,随着宇宙膨胀,密度和温度不断地变小.伽莫夫当时预测今天宇宙的背景温度在5K附近,这个预言在20世纪60年代被观测到的宇宙微波背景所证实,现在确定温度为2.7K.从此学术界普遍接受了伽莫夫的宇宙模型,并称之为标准模型或大爆炸宇宙模型.虽然大爆炸宇宙模型可以解释众多的观测现象,却存在许多疑难,如视界疑难、准平坦性疑难、结构起源疑难等,宇宙学常数疑难也是其中之一.因此人们在宇宙甚早期引入暴胀(inflation)阶段——宇宙以指数形式快速膨胀.暴胀模型可以解决上述一些疑难,但宇宙学常数问题依然存在.关于宇宙学常数问题的一些综述文章可参阅文献[1—3].

1998年以前,物理学家和天文学家一般都认为宇宙学常数等于零或很小可忽略,而且粒子物理学家认为,宇宙学常数可以看作宇宙真空能量密度的一种量度.于是问题便产生了,为什么宇宙学常数等于零或者说相对于粒子物理尺度,宇宙真空能量密度如此之小?这个问题至今已困扰了物理学家几十年.

但近几年来,越来越多的观测证据表明,我们所处的宇宙正处在加速膨胀的阶段.天文学家们用各种观测方法和手段,例如利用超新星(supernovae)、宇宙微波背景(cosmic microwave background)和引力透镜(gravitational lensing)等遥远天体的观测,获得了比较精确的数据,这将在下一部分中作详细的介绍.观测结果都倾向于一个平坦的宇宙,而且宇宙学家认为,一个正的宇宙学常数对所观测到的数据有最好的拟合结果.今天,几乎所有宇宙学家都相信宇宙学常数的存在,并期待在宇宙学上有更多的观测效应.

现在的观测事实表明宇宙学常数不仅存在,而且其能量密度与物质成分在同一量级,还稍大一点.于是人们又问,为什么物质和真空能量密度在今天会如此巧合地相同呢?再者,随着宇宙演化,物质密度越来越低,真空能量密度随时间则是个常数,那么宇宙的命运会怎样?这个问题比以前的宇宙学常数问题更不易解释,被称为新的宇宙学常数疑难^[4,5].

2 宇宙学常数的观测检验

宇宙学常数是否存在要通过天文观测来检验.现在观测上一般用相对密度 $\Omega_i = \rho_i / \rho_c$,其中 ρ_c 是宇宙平坦时的临界密度, i 可分别代表物质和宇宙学常数.至今,许多天文学家 and 大型天文观测仪器已投入到宇宙学常数的观测工作中,产生了许多方法,并得到了相当好的观测资料.1998年以来,下面四种观测方法在测量宇宙学常数工作上获得重大进展: Ia型超新星观测、宇宙微波背景(CMB)观测、引力透镜观测和直接测定宇宙的物质密度.

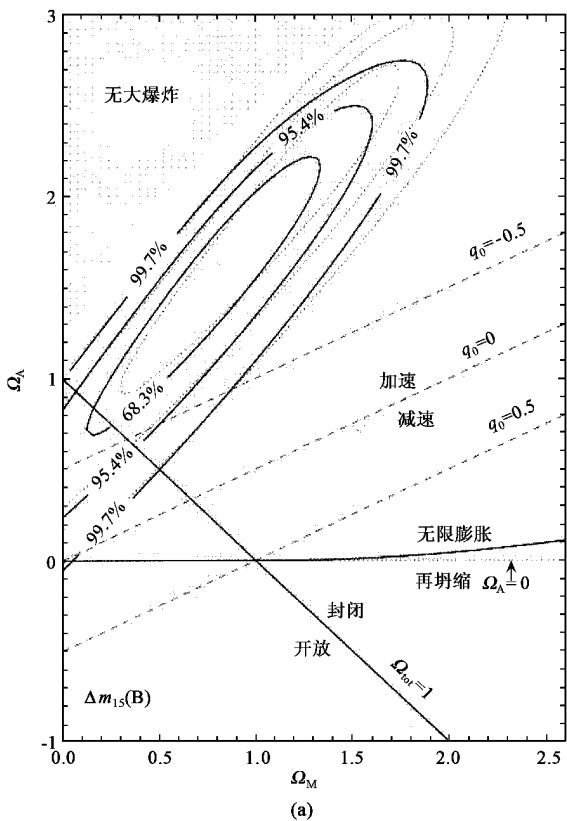
2.1 Ia型超新星观测

测定宇宙学常数需要观测非常遥远(即宇宙早期)的天体,而离我们越远,天体就越暗,越不易观测.近年来,超新星的观测在此方面取得了重大的突破.我们知道超新星是很稀少的,像银河系大小的星系一个世纪只能有几次超新星现象发生.现代的大型天文望远镜可以观测遥远宇宙空间的大量星系,而且超新星是非常明亮的,一次普通的超新星爆发所产生的光度比我们整个银河系的光度还要大一些.其中一类超新星即Ia型超新星又有一个特殊的性质,它们具有几乎完全一样的内禀光度,因而被天文学家用来作为“标准烛光”^[6].

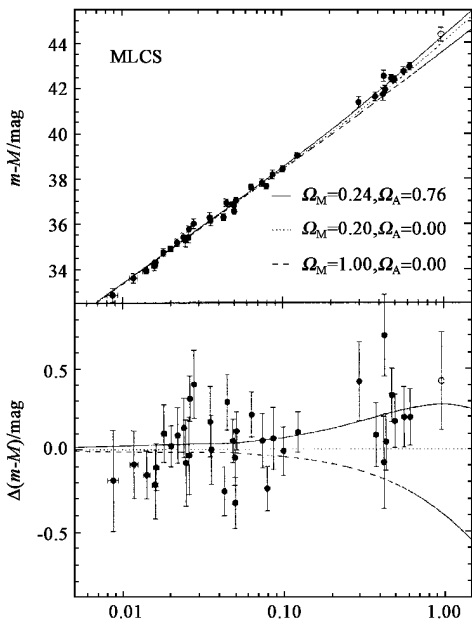
现在主要有两个独立进行高红移Ia型超新星观测的小组:High-Z Supernova Search^[7-10]和Supernova Cosmological Project^[11-13].他们的工作发现遥远的超新星显得比由物质决定的平坦宇宙所预测的要暗一些.如果这是宇宙学起源的,便意味着如果给定一个红移值,超新星要比原先预测的离我们更远一些.图1中给出了High-Z Supernova Search小组的测量结果.左图是 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 平面图,右图是哈勃图(距离-红移关系), Ω_M 为物质密度.他们的结果是很令人惊讶的,观测结果支持存在一个正的宇宙学常数,而且完全排除了标准宇宙模型 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1.0, 0)$,他们拟合现在的观测结果给出宇宙学参量为 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.24, 0.76)$.2001年,哈勃空间望远镜测到红移达1.7的Ia型超新星^[14],进一步支持宇宙学常数的存在, Ω_Λ 在0.65—0.7之间,并展示了从减速膨胀到加速膨胀的宇宙演化图像.

2.2 宇宙微波背景观测

1964年,美国贝尔实验室的两位工程师彭齐亚斯和威尔逊发现来自宇宙背景、高度各向同性的微



(a)



(b)



图1 High-Z Supernova Search 小组搜寻高红移 Ia 型超新星得到的观测结果

(a) $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 平面图 横坐标为 Ω_M 纵坐标为 Ω_Λ 3σ 误差范围内

排除了标准模型 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (1.0, 0)$;

(b) 哈勃图, 它支持了一个具有正的宇宙学常数的宇宙模型

波辐射, 后来被证认是一个温度只有 2.7K 的黑体辐射谱. 1989 年 11 月, COBE 卫星的上天获得了更丰

富的数据, 特别是发现了宇宙微波背景中存在着温度分布的各向不均匀性^[15]. 观测分析得到的功率谱可以对宇宙学参数和模型进行强有力的限制.

1998 年, 两个独立的气球实验 BOOMERANG^[16, 17] 和 MAXIMA-1^[18, 19] 对 CMB 各向异性作了更精确的观测, 获得了早期宇宙的许多重要信息. 气球实验对宇宙微波背景观测最大的一个贡献是发现我们所在的宇宙基本上是平坦的, 即 $\Omega \sim 1$, 支持了暴胀的宇宙模型. 图 2 中显示了 BOOMERANG 的是新观测结果和超新星观测对 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 平面图的限制, 拟合的结果在 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ 附近.

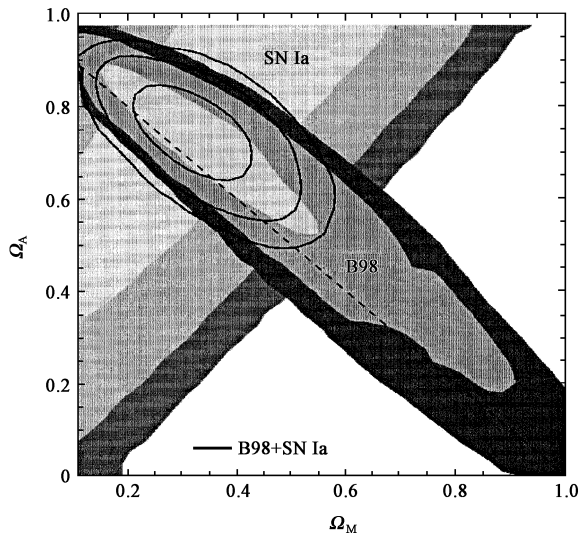


图2 气球飞行实验 BOOMERANG 在 2001 年公布的结果联合超新星观测数据对 $\Omega_M - \Omega_\Lambda$ 平面图的限制. 它们不仅仅证实了宇宙是平坦的, 并且对宇宙学常数有了精确的限定:

$$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$$

2.3 引力透镜观测

回溯到宇宙早期某个红移值处, 空间的体积大小对宇宙学常数 Ω_Λ 非常敏感^[20]. 因此, 对观测到的天体进行计数, 比如观测每立方兆秒差距 (Mpc^{-3}) 数密度大小, 可以对 Ω_Λ 进行检验. 不过这种方法受到可见天体的光度函数演化的影响, 但由于引力透镜效应是由宇宙空间致密、不可见的天体所造成, 因而不像可见天体一样对演化那么敏感. 因此引力透镜是测定宇宙学常数大小的一个重要而且很有前景的手段.

在一个平坦的宇宙里, 观测到引力透镜数密度偏小, 暗示着宇宙学常数大小不为零. Kochanek 等人在 1996 年对已有的数据进行分析^[21, 22], 给出了 $0 < \Omega_\Lambda < 0.7$. 当前这方面工作还在不断进行和深入, 包

括深空弱引力透镜的巡天和哈勃深场的透镜效应等.

2.4 宇宙物质密度的测量

因为 CMB 观测已基本确定宇宙是平坦的, $\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$, 所以我们测量物质密度 Ω_M 的大小, 便决定了 Ω_Λ .

一个传统方法是直接利用光度密度来“秤”星系团的质量, 将维里定理应用于星系团的动力学, 可以估测得到: $\Omega_M = 0.2 \pm 0.1^{[23]}$. 另一个方法是利用重子物质密度 Ω_B . 因为绝大多数的重子物质分布在星系团际气体中^[24], 我们定义一个量 f_{gas} 为气体占总质量的份额, 它是通过观测气体的 X 射线辐射^[25]或热电子散射造成微波背景温度的偏离(Sunyaev-Zeldovich 效应)^[26]来测定的, 得到的结果一般为 $0.1 < f_{\text{gas}} < 0.2$. 由于重子物质密度完全由大爆炸宇宙原初的核合成过程决定, $\Omega_B \sim 0.04^{[27]}$, 于是得到物质密度为 $\Omega_M = 0.3 \pm 0.1$. 还有一种途径是利用高红移星系团的性质得到物质密度参数, 最近超大质量星系团的发现表明 $\Omega_M \sim 0.2^{[28]}$, 并进一步确定了 $\Omega_M < 1.0^{[29]}$. 最后, 物质密度参数也可以从密度涨落的功率谱测量中获得, 这种方法类似于 CMB 观测结果表明 $\Omega_M \sim 0.36^{[30]}$.

因此, 综合以上关于宇宙物质密度测量的结果, 得到一个很确定的结论 $0.1 < \Omega_M < 0.4$. 这同时也支持了具有一个非零且为正的宇宙学常数的平坦宇宙模型, 与超新星和 CMB 的测量结果一致.

3 真空能量密度与宇宙学常数

粒子物理学给我们带来了一个对真空全新的看法, 即真空仅仅是一个能量最低的状态, 真空是有能量的, 于是便有了真空能量密度的概念. 先回顾一下一维谐振子这个经典的例子. 由于量子化条件, 存在一个对易关系(取自然单位制) $[q, p] = i\hbar$, 使系统的势能(正比于 q^2)和动能(正比于 p^2)不可能同时消失, 而系统的能量最低态是两种能量之和, 其最小值不为零. 我们都知道谐振子系统基态能量(或零点能)为 $\hbar\omega/2$, 这是一个非零的正值. 在量子化的场中, 也会有同样的现象产生, 存在一个真空能量密度 ρ_v , 所以真空能量是一种量子效应.

当我们将真空能与引力耦合在一起时, 场方程中宇宙学常数项便产生了. 因此, 按现代物理学家的观点, 宇宙学常数是量子涨落的结果, 等效于真空能

量密度. 我们依然可写出宇宙学常数 Λ 导致的能量-动量张量的能量密度 $\rho_\Lambda = \Lambda/(8\pi G)$ 和压强 $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$. 由于压强与能量密度正好大小相同而符号相反, 因此宇宙学常数在爱因斯坦场方程中起一个“反引力”的效果, 可以导致一个加速膨胀的宇宙. 现在一般引进有效宇宙学常数 $\Lambda_{\text{eff}} = 8\pi G\rho_\Lambda + \Lambda_0$, Λ_0 是裸的宇宙学常数, 而我们观测的是 Λ_{eff} , 来自两方面的共同贡献.

利用量子理论, 我们可以计算真空能量密度的大小. 在温伯格-萨拉姆的弱电统一理论中, 对称性破缺与未破缺对称两相之间的势能差异非常大, 而且认为早期宇宙在极高温度时处于对称相, 而现在低温宇宙处于对称性已破缺的阶段, 宇宙学常数可看作这两相的能量差. 例如弱电统一对称性破缺的能量差为 $M_{\text{EW}} \sim 200\text{GeV}$, 对真空能量的贡献约为 $\rho_{\Lambda, \text{EM}} \sim (200\text{GeV})^4 \sim 10^{47} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$. 我们所用的量子场理论在极早期, 即普朗克时代可能已失效, 因此在接近普朗克尺度时对称性相变有一个能量差, $M_{\text{pl}} \sim 10^{18}\text{GeV}$, 其贡献应该是我们今天真空能量密度的大小 $\rho_{\Lambda, \text{pl}} \sim 2 \times 10^{110} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$.

然而天文观测发现今天真空能量密度仅为 $\rho_{\Lambda, \text{obs}} \sim 2 \times 10^{-10} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($M_{\text{obs}} \sim 10^{-12}\text{GeV}$), 与理论值差 120 个量级, 即使按能量差算也有 30 个量级的差异, 于是问题就产生了: 为什么宇宙学常数观测的值如此小呢? 是量子场论本身错了还是天文学家的观测有误? 这一直困扰着理论物理学家和宇宙学家们, 这便是开头提到的旧的宇宙学常数疑难. 在第二部分中, 我们注意到现在的观测结果 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) = (0.3, 0.7)$ 很奇怪, 为什么当前的宇宙物质密度和真空能量密度具有相同的数量级. 难道真的存在“上帝的第三只手”, 还是有更深的物理学起源? 旧的还未解决, 新的宇宙学常数疑难又诞生了.

4 一些物理学理论的尝试

宇宙学常数问题一直吸引理论物理学家的注意, 被认为是改进粒子物理模型的一个重要途径. 超对称(SUSY)的作用一直被认为是压缩真空能非常有效的途径. 但是在超对称破缺后, 宇宙学常数为什么还是为零或太小, 而且物理学家还需解释为什么今天的宇宙学常数会是这个值. 当前, 理论物理学家已经提出了许多想法, 比如虚虫洞(virtual wormholes)的效应^[31]、新的引力理论^[32]、保形不变性^[33]和

德西特空间的量子效应^[33]等,这里只介绍其中三种最重要,也是现在看来最具有活力和前景的物理机制:膜(brane)世界模型、精质(quintessence)和人择原理。

4.1 膜世界模型

这个新想法的原始思想是基于弦的理论(string theory),它考虑额外的时空维数。普通的物质被限制在四维的世界里,而这个四维空间又嵌在一个更高维的时空里,并且只有引力场和某些其他的场可以在额外的维数里传播^[34]。现在比较流行的模型都是建立在高维图像下,我们这个由夸克、轻子和相互作用的场构成的四维世界则变成一个更高维宇宙中的超曲面,这个超曲面用现代的术语即是一个膜。由于引力很难限制一个膜上,因此要求额外的维数相当致密,尺度在毫米量级^[35],或者它的时空是极度弯曲的^[36]。在这样的框架下,人们试图将宇宙学常数疑难变成一个易于处理的形式。

一个简单例子,考虑五维的情形。如果在膜上引入一个正的真空能 Λ ,则产生一个向外的“排斥力”,而且在一个四维膜世界里,真空能会表现出与一个标准四维世界不同的行为。例如,真空能对描述膜世界膨胀的哈勃常数的贡献是一个二次形式: $H^2 = \lambda_B^2(36M^6) + \dots$,其中 M 是基本的五维尺度^[37]。然后在膜外的宇宙部分引入另一真空能 λ_B ^[38],它对膜中哈勃常数的贡献则是标准的: $H^2 = \lambda_B(6M^3) + \dots$,因此,四维空间中有效的宇宙学常数应是两种真空能的共同贡献。当然,如果我们使 $\lambda_B = -\lambda_B^2/(6M^3)$ (即Rardall-Sundrum条件^[39]),则有效的宇宙学常数便消失了。不过,Rardall-Sundrum模型要求对初始条件进行微调(fine-tuning),因此许多物理学家都愿意从动力学角度来思考。

一般假设在膜外存在一个与物质完全耦合的标量场。由于标量场的存在,膜的真空能会有一个修正,从而可以屏蔽四维空间中的宇宙学常数。许多理论物理学家引入不同的标量场形式来计算对膜中真空能的修正,并取得了一定的进展^[40,41]。现在人们也试图利用多个膜世界的动力学演化模型来解决宇宙学常数疑难^[42,43]。

4.2 精质

现在一些物理学家宁愿用一种称为“暗能量”(dark energy)的宇宙成分来代替宇宙学常数解释观测。假设一种成分 x ,它满足一个状态方程 $p_x = \omega_x \rho_x$, ω_x 在 α (普通物质)和 -1 (宇宙学常数)之间,而 $\omega_x > 0$ 的源则比一般的物质退行得快些,然而当

$\omega_x < -1$ 时,则是非物理的。于是整个宇宙则变成 x 与普通物质共同主宰的平坦的世界。精质模型则是假定这种暗能量成分是一种单一均匀的标量场^[44]。

有一类尝试是想象一个标量场 $\phi(t)$,当 ϕ 接近无穷大时,势函数 $V(\phi)$ 单调递减到零。许多人已经提出得到这种暗能量成分的方法。一种模型是所谓的示踪场(tracker field)^[45],场的能量密度 ρ_ϕ 的下降比率比物质密度 ρ_M 要小一些。在宇宙大爆炸时,物质起主导作用,而随着时间的演化,物质密度下降的快, ρ_M 会在某一时刻与 ρ_ϕ 具有相同量级,此后, ρ_ϕ 将起主导作用。因此物理学家和宇宙学家认为我们这个时候正处于转型时期。示踪场关于 ρ_ϕ 与 ρ_M 地位相互转化的观点有一个优点,即不需要对初始条件进行微调。精质成分出现的另一种可能性是假设 x 在 $V(\phi)$ 中产生一个在局域内的最小值,当 ϕ 接近这个值时, ϕ 演化会变慢,而且 ρ_ϕ 也会降低得更慢,这种情形使得暴胀阶段成为可能^[46]。因此,如果一个场 ϕ 在精质形式下产生一个动力学演化的宇宙学常数,则 ϕ 是导致由真空能主宰的暴胀阶段的可能候选者,精质成分与暴胀子(inflaton)是同一个场。

关于精质还存在另一类模型^[47],即假设标量场还未达到其稳定的基态。但是为了吻合观测的宇宙学常数,模型要求 ϕ 非常轻: $m_\phi \sim 10^{-33}$ eV,如此小的值将导致标量场与物质的耦合相当小,因此还有待进一步探讨。

4.3 人择原理

在一些宇宙学理论中,观测到的大爆炸仅仅是一个系统中的一员,这个系统可能在同一时空中不同地点和时间包括不同的膨胀区域,或具有不同的宇宙波函数。如果在这个系统的不同成员里,真空能密度 ρ_V 是不一样的,则天文学家观测到 ρ_V 的值必须满足如下条件: ρ_V 值必须适应智慧生命的演化,即有智慧的观测者必须在适合自己生存的外部条件下进行实验^[48],这便是人择原理。

一个对正的真空能最直接的限制是真空能不能太大,以至于星系无法形成。因为宇宙学常数相当于一个排斥力,当它开始主宰整个宇宙演化时,宇宙中致密的区域不可能坍缩。如果这种情形发生在星系形成的时代,宇宙中则无法形成星系,也不能形成恒星、行星,更不用说产生智慧生命人类了。这个条件要求在星系形成时真空能密度不能比物质密度大,即 $\Omega_\Lambda(Z_{gal}) \leq \Omega_M(Z_{gal})$,如果假设第一代星系形成在 $Z \sim 4$ 的时期,则可以计算今天的宇宙真空能与

物质之比 $\Omega_{A0}/\Omega_{M0} \leq (1 + Z_{gal})^3 \sim 125$. 温伯格认为人择原理可以同时解决新老宇宙学常数疑难^[41], 但是现在许多物理学家认为真正理解宇宙学常数疑难还是应着眼于基本物理学的发展^[49].

5 21 世纪的展望

今天的天文观测证据已经展示了我们所处的宇宙是(至少近似)一个平坦的世界, 并且 $(\Omega_M, \Omega_\Lambda) \approx (0.3, 0.7)$. 近代物理学将宇宙学常数作为真空能的一种量度, 而观测的宇宙学常数值相对于粒子物理真空能量太小了. 巨大的差异和今天 Ω_Λ 与 Ω_M 数量级上巧合地相等构成了今天的宇宙学常数疑难, 引起了广大物理学家和天文学家的共同兴趣.

物理学家不断提出新的模型, 来修正现有的引力理论和量子场论. 一般人们都期望某种对称性或在引力中加入某种与物质耦合的标量场, 来压缩观测到的有效宇宙学常数. 虽然现在还不能真正解决这个疑难, 但物理学家的努力还在继续. 引力场的量子化问题是否能最终解决, 也许意味着新物理学的诞生.

各种模型和理论层出不穷, 最后还需要天文观测来进行检验和区分. 现代天文不断改进天文观测技术和数据处理功能, 以便得到更精确的结果. 由于天文观测对系统性能非常敏感, 要求我们进行更多的统计, 提高光谱测量的分辨本领. 再者, 对高红移的天体, 比如测 I a 型超新星, 我们必须考虑星系际尘埃的红化影响, 这也是未解决的问题. 未来几年内, MAP 和 PLANCK 卫星关于宇宙微波背景的观测及 SNAP 探测器对大量 I a 型超新星的测量可能会给我们提供更精确的测量结果. 中微子和引力波的探测可以向我们显示宇宙更早期的图像, 提供更原初的结果.

20 世纪初, 相对论和量子理论的诞生改变了人们的宇宙观. 当进入新世纪时候, 也许我们很幸运, 因为宇宙学常数疑难作为当前物理学的一朵“乌云”, 很可能为我们提供了更深入研究基本物理学的一条线索. 现在物理学家和宇宙学家的困惑也许反映出我们的世界本来是简单的, 它具有现在未知的美妙而又更基本的结构, 等待着人们去探索. 我们期待在 21 世纪能有突破性进展.

参 考 文 献

[1] Weinberg S. Rev. Mod. Phys. ,1989 61 :1
31 卷(2002 年) 8 期

[2] Carroll S M ,Press W H ,Turner R L. Ann. Rev. Astron. Astrophys. ,1992 30 :489
[3] Carroll S M. astro-ph/0004075
[4] Weinberg S. astro-ph/0005265
[5] Straumann N. astro-ph/0009386
[6] Branch D ,Temmann G A. Ann. Rev. Astron. Astrophys. ,1992 30 :359
[7] Garnavich P M *et al.* Astrophys. J. ,1998 493 :153
[8] Schmidt B P *et al.* Astrophys. J. ,1998 507 :46
[9] Riess A G *et al.* Astron. J. ,1998 116 :1009
[10] Garnavich P M *et al.* Astrophys. J. ,1998 509 74
[11] Perlmutter S *et al.* Astrophys. J. ,1997 483 :565
[12] Perlmutter S *et al.* Nature ,1998 391 :51
[13] Perlmutter S *et al.* Astrophys. J. ,1999 517 :565
[14] Riess A G *et al.* astro-ph/0104455
[15] Smoot G F *et al.* Astrophys. J. ,1992 396 :L1
[16] Netterfield C B *et al.* astro-ph/0104460
[17] de Bernardis P *et al.* astro-ph/0105296
[18] Lee A T *et al.* astro-ph/0104459
[19] Stompor R. astro-ph/0105062
[20] Humuy M *et al.* Astron. J. ,1996 112 :2438
[21] Kothanek C S. Astrophys. J. ,1996 466 :638
[22] Falco E E *et al.* Astrophys. J. ,1998 494 :47
[23] Carlberg R G *et al.* Astrophys. J. ,1996 462 :32
[24] Fukugita M *et al.* Astrophys. J. ,1998 503 :528
[25] Moler J *et al.* Astrophys. J. ,1999 517 :627
[26] Carlstrom J E *et al.* astro-ph/9905255
[27] Schramm D N ,Furner M S. Rev. Mod. Phys. ,1998 70 :303
[28] Bachall N A ,Fan X. Astrophys. J. ,1998 504 :1
[29] Bachall N A *et al.* Astrophys. J. ,1998 485 :L53
[30] Peacock J A ,Dodds S J. Mon. Not. R. Astron. Soc. ,1994 ,267 :1020
[31] Coleman S. Nucl. Phys. B ,1998 310 :643
[32] Sturobinsky A A. JETP Lett. ,1998 68 :757
[33] Antoniadis I ,Mazur P O ,Mottola E. Phys. Lett. B ,1998 444 :284
[34] Ozer M ,Taha M O. Mod. Phys. Lett. A ,1998 13 :571
[35] Arkani-Hamed N *et al.* Phys. Lett. B ,1998 439 :263
[36] Kakshadze Z ,Tye S H. Nucl. Phys. B ,1999 548 :180
[37] Vizzer M. hep-ph/9910093
[38] Binétruy P *et al.* Nucl. Phys. B 2000 565 :269
[39] Arkani-Hamed N *et al.* hep-th/9809124
[40] Akama K. hep-th/0001113
[41] Arkani-Hamed N *et al.* hep-th/0001197
[42] Kachru S ,Schulz M ,Silverstein E. hep-th/0002121
[43] Tye S H ,Wesseman I. hep-th/0006068
[44] Kanti P ,Olive K A ,Pospelov M. Phys. Rev. D 2000 62 :126004
[45] Ferreira P G ,Joyce M. Phys. Rev. D ,1998 58 :1023503
[46] Zlatev I ,Wang L ,Steinhardt P J. Phys. Rev. Lett. ,1999 82 :898
[47] Albrecht A ,Skordis C. Phys. Rev. Lett. ,2000 84 :2076
[48] Frieman J ,Hill C ,Watkins R. Phys. Rev. D ,1992 46 :1226
[49] Hogan C J. astro-ph/9909025
[50] Witten E. hep-ph/0002297