

# 宇宙起源与阿里原初引力波探测

张新民<sup>1,†</sup> 苏萌<sup>2</sup> 李虹<sup>3</sup> 万友平<sup>1</sup> 蔡一夫<sup>4</sup> 李明哲<sup>5</sup> 朴云松<sup>6</sup>

(1 中国科学院高能物理研究所 理论物理研究室 北京 100049)

(2 美国麻省理工学院物理系 马萨诸塞州剑桥市 02139)

(3 中国科学院高能物理研究所 粒子天体物理中心 北京 100049)

(4 中国科学技术大学天文学系 合肥 230026)

(5 中国科学技术大学交叉学科理论研究中心 合肥 230026)

(6 中国科学院大学物理学院 北京 100049)

2016-05-04收到

† email: xmzhang@ihep.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160506

## The origin of the universe and the Ali primordial gravitational waves detection

ZHANG Xin-Min<sup>1,†</sup> SU Meng<sup>2</sup> LI Hong<sup>3</sup> WAN You-Ping<sup>1</sup> CAI Yi-Fu<sup>4</sup>  
LI Ming-Zhe<sup>5</sup> PIAO Yun-Song<sup>6</sup>

(1 Theoretical Physics Division, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(2 Department of Physics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02139, Massachusetts, America)

(3 Particle Astrophysics Center, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Department of Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(5 The Interdisciplinary Center for Theoretical Study, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(6 School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**摘要** 20世纪建立起的宇宙大爆炸模型取得了巨大的成功,但仍期待着新的革命性的突破。探知宇宙起源及其演化是新世纪对全世界科学家的新挑战,其重要性在近期公布的中国“十三五”规划纲要中得到了高度的肯定。现代宇宙学理论,暴胀以及非奇异宇宙模型如反弹等,预言了原初引力波的存在,但至今还没有被实验证实。不同于近期LIGO合作组探测到的黑洞引力波,原初引力波是宇宙诞生时期产生的,携带着丰富的宇宙学信息,是引力波探测的全新波段,是引力波探测的下一个突破方向。文章简述了中国的阿里原初引力波实验计划及相关的科学问题。

**关键词** 宇宙起源,原初引力波,阿里计划

**Abstract** The hot Big Bang cosmology has achieved numerous successes in the past decades in describing the evolution of our universe, but several conceptual issues remain to be addressed. Accordingly, a potentially revolutionary breakthrough is expected within modern cosmology in near future. The goal of probing the origin of our universe and its evolution has become one major challenge for scientists around the world, and its importance has been appreciated and highlighted in the recently released 13th Five-Year Plan by Chinese government. Very early universe models, such as inflation and bounce, predicted an existence of primordial gravitational waves (GWs), but these signals have not yet been observed by experiments. Unlike the GW signals originated from black holes as has been detected by the LIGO team, these primordial GWs were pro-

duced right after the Big Bang, and hence, would carry fruitful information about the very early universe. In addition, the frequency band of primordial GWs is extremely low, which may open a brand-new window for the next breakthrough of GW detections. In this article, we will briefly introduce the Chinese Ali Project and the associated scientific topics.

**Keywords** origin of the universe, primordial gravitational waves, Ali Project

## 1 引言

不久前美国领导的激光干涉引力波天文台(LIGO)和美国自然科学基金委员会联合宣布探测到了来自十三亿年前两个黑洞并合产生的引力波信号<sup>[1]</sup>,引起全世界轰动。引力波是爱因斯坦广义相对论的重要预言,探测到引力波是对广义相对论的一个重要的直接验证。引力波的起源大致分为两类:天体物理起源和宇宙学起源。对应不同的物理起源,信号所处的频段不同,因此相应的探测方式也不一样。这次LIGO探测到的是天体物理起源的高频引力波,频率为100 Hz左右。今后的空间激光干涉实验(如欧洲太空局的eLISA)以及脉冲星计时预期可以观测到更低频率的引力波,但是其主要目标仍然是各类天体物理过程所导致的引力波信号,探测频率至少在 $10^{-9}$  Hz以上。

宇宙学起源的引力波创生于宇宙极早期,是一种时空的量子涨落效应,充满了整个宇宙并构成一个背景,被称为原初引力波。这种引力波虽然具有连续谱,但是它的不同波段的演化行为很不一样,总的来说到今天它的高频信号受宇宙演化的影响被极大地压低,上述地面、空间以及脉冲星计时等引力波实验对它无能为力。只有它的极低频段( $10^{-15}$  Hz以下,其波长相当于宇宙的尺度)才能保持较强的信号,人们必须通过设计宇宙学的观测和实验来探测它。幸运的是,这种极低频的原初引力波会在宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)上留下独特的印记。原初引力波的性质与宇宙起源时期的物理规律以及后期的宇宙演化行为息息相关,它所携带的物理信息极为丰富,极有希望为人类一窥宇宙

起源的奥秘提供全新的观测窗口。

CMB是宇宙大爆炸后38万年时遗留下来的光子,它有两个偏振模式:E模式和B模式。其中的B模式偏振是由原初引力波产生的,因此用CMB望远镜对B模式偏振的观测是探测原初引力波的直接途径。

迄今为止已经建造和正在规划中的地面CMB望远镜,集中在智利天文台和美国南极极点科考站两个台址,而北半球是空缺的。2014年5月,中国科学院高能物理研究所领导的研究团队提出,基于我国西藏阿里天文台具有的得天独厚的地理环境优势,开展CMB观测,探测原初引力波。通过过去两年的研究,国际上已公认阿里是目前已知北半球最佳的CMB观测台址。阿里原初引力波实验计划是通过中方领导、中美合作的方式,在西藏阿里天文台建造一台小口径高灵敏度CMB探测器,首次实现北天区CMB观测,寻找原初引力波信号。同时参加美国南极BICEP4实验,结合阿里实验,实现一南(美国主导、中方参加)一北(中方主导、美方参加)的地面CMB实验,对原初引力波观测实现全天区覆盖。

原初引力波一旦被探测到将是对现代宇宙学理论,例如暴胀模型、反弹和循环模型等最强有力的检验,对宇宙学具有重要意义,同时对基础物理学,例如CPT对称性检验等意义重大。本文将简述阿里计划及其相关科学。

## 2 大爆炸宇宙学和暴胀宇宙学

现代宇宙学已经进入到“精确宇宙学”时代<sup>[2]</sup>,其标准框架基于大爆炸宇宙学和暴胀宇宙学。大爆炸宇宙学模型成功地解释了遥远星系的

星光红移，宇宙中轻元素的丰度，预言了宇宙学微波背景辐射。大爆炸宇宙学给人们树立了一种全新的宇宙观，颠覆了“稳态宇宙观”。大爆炸模型虽然极其成功，它依然面临着许多无法自圆其说的疑难问题，比如说视界疑难、平直性疑难、超重粒子超出疑难以及大尺度结构的来源问题等。1980年代，暴胀宇宙学模型被提出来解决大爆炸模型的上述问题<sup>[3-8]</sup>。

暴胀是指宇宙在极早期经历了一段加速膨胀的过程，这要求宇宙的能量成分具有负的压强。非相对论的物质和相对论性的辐射气体都不具备这一性质，因而不能给出暴胀。最简单的负压强能量成分是宇宙学常数，它的状态方程等于 $-1$ ；当宇宙被宇宙学常数主导时，宇宙能够加速膨胀。但是这样的宇宙学图像存在着暴胀如何退出的问题。

一种很自然的实现暴胀的做法是引入叫做“暴胀子”的标量场，它的拉格朗日量可以写作

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial^\mu \Phi \partial_\mu \Phi - V(\Phi) .$$

在均匀且各向同性的宇宙中，它的能量和压强分别为

$$\rho = \frac{1}{2} \dot{\Phi}^2 + V(\Phi) ,$$

$$p = \frac{1}{2} \dot{\Phi}^2 - V(\Phi) .$$

当动能远小于势能时，就给出负的压强，驱动宇宙暴胀。如图1所示，在一般的慢滚模型中，暴胀能够将宇宙的标准因子增大约 $e^{60}$ 倍，解决大爆

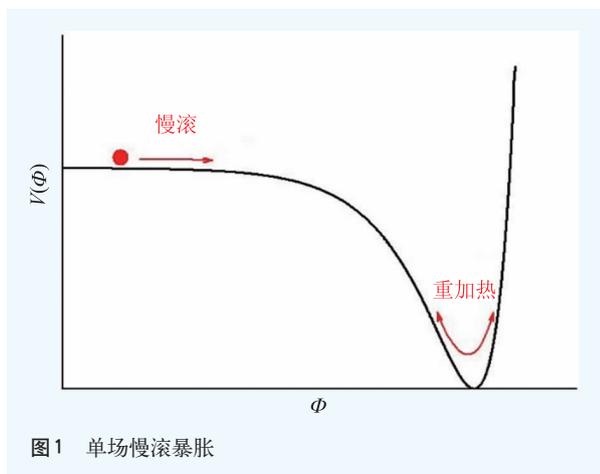


图1 单场慢滚暴胀

炸模型面临的视界疑难、平直性疑难和超重粒子超出疑难。更重要的是，暴胀时期物质场的真空量子涨落被放大，当其波长迅速扩张到超过视界的尺度时，就形成经典的原初密度扰动。原初密度扰动是宇宙大尺度结构形成的种子，这种初始的密度非均匀性在暴胀结束以后由于引力不稳定性作用而得到增长，形成了今天观测到的宇宙大尺度结构以及CMB中的各向异性。从目前的CMB观测结果中我们可以推断出原初密度扰动具有的一些性质：它是绝热的、近标度不变的并满足高斯型统计，与一般慢滚暴胀模型的预言非常一致。

除了标量型的原初密度扰动以外，宇宙时空本身的真空量子涨落经历过暴胀后会形成超视界尺度上的张量型扰动，即原初引力波<sup>[9-11]</sup>。它是纯时空的量子效应，与物质场没有直接关系。因此可以说，原初引力波是诸如暴胀这样的在解释宇宙观测结果上非常成功的极早期宇宙模型的自然预言。它是一种量子引力效应，探测原初引力波对研究极早期宇宙的动力学以及研究量子引力等基本物理都有非常重要的意义。

在广义相对论下，原初引力波完全由真空涨落生成，其动力学演化可由如下的运动方程描述：

$$h_k'' + 2 \frac{a'(\tau)}{a(\tau)} h_k' + k^2 h_k = 0 ,$$

这里 $k$ 是波数，与频率的对应关系是 $f = k/(2\pi a)$ 。可以看出，对于固定的波数，频率以 $1/a$ 的方式逐渐红移，到今天(标度因子归一)相应的观测频率为 $f = k/(2\pi)$ 。方程左边的 $h_k$ 表示原初引力波， $a$ 是衡量宇宙大小的标度因子， $\tau$ 是共形时间，撇号表示对时间的导数，后面将要提到的宇宙膨胀率(即哈勃参数)为 $H = a'/a^2$ 。由上述方程我们可以发现，居于视界外( $k \ll aH$ )的引力波保持不变，而进入视界内( $k > aH$ )的引力波类似于阻尼振子，阻尼来自于宇宙膨胀本身， $h_k$ 具有振荡行为，但是振荡的幅度在衰减。

刻画原初引力波的重要物理量主要有两个，第一个是功率谱：

$$\Delta_h^2(k, \tau) \equiv \frac{d\langle 0 | \hat{h}_{ij}^2 | 0 \rangle}{d \ln k} = 64\pi G \frac{k^3}{2\pi^2} |h_k(\tau)|^2,$$

它衡量的是引力波在不同尺度上的幅度。如前面所述，暴胀模型还预言了密度扰动的功率谱，目前已经有很精确的测量，因此人们经常用引力波的功率谱与密度扰动功率谱的比值，即张标比  $r$ ，来表示引力波的幅度大小。另一个描述引力波的重要物理量是能量谱：

$$\Omega_{\text{gw}}(k, \tau) \equiv \frac{1}{\rho_{\text{crit}}(\tau)} \frac{d\langle 0 | \hat{\rho}_{\text{gw}}(\tau) | 0 \rangle}{d \ln k},$$

其中

$$\rho_{\text{crit}}(\tau) = \frac{3H^2(\tau)}{8\pi G}$$

是宇宙临界能量密度， $\rho_{\text{gw}}$  表示引力波的能量密度。暴胀结束后引力波的功率谱的演化可以用下式来描述：

$$\Delta_h^2(k, \tau) = T_h(k, \tau) \Delta_h^2(k, \tau_i),$$

其中  $\Delta_h^2(k, \tau_i)$  是暴胀刚结束时的原初功率谱， $T_h(k, \tau)$  是转移函数。图2显示了  $r=0.1$  时的原初引力波能量谱。

根据一般的慢滚暴胀模型的预言，遗留到今天的原初引力波在  $10^{-15}$  Hz 以上的频段中都会被压低得很厉害，相应的能谱信号难以被中高频引力波实验捕捉到。只有在频率小于  $10^{-15}$  Hz 的长波段，能谱才会显著地大起来。目前探测原初引力波最好的方式是宇宙微波背景辐射(CMB)的偏振实验。与高频引力波实验不一样，CMB的偏振实验探测的引力波频率范围处于  $10^{-18} - 10^{-15}$  Hz，从图2可以看出，在这个频率范围内原初引力波的能量谱与高频段相比要高出好几个量级。

CMB光子的偏振图像可分解为两种独立的模式：一种是E模式，一种是B模式。B模式偏振是“有旋”的，因而它在空间反射作用下具有与E模式不同的性质。在图3中，沿着通过中心并垂直于纸面的轴作空间反射，我们将会发现E模式图像保持不变，而B模式的  $B>0$  和  $B<0$  的两个图像会互换。换句话说，E模式具有偶宇称，B模式具有奇宇称。与温度涨落的产生过程一样，与电子发生的汤姆孙(或康普顿)散射是产生CMB

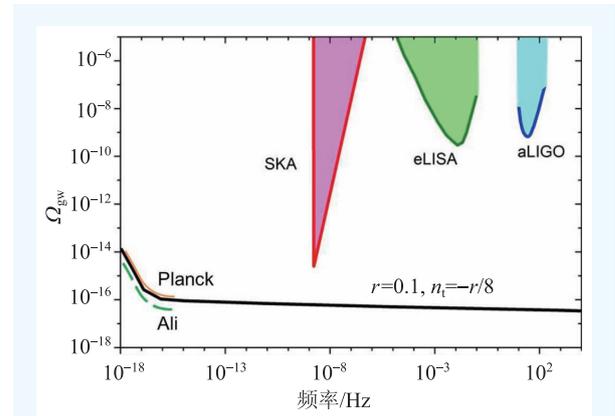


图2 原初引力波的能量谱

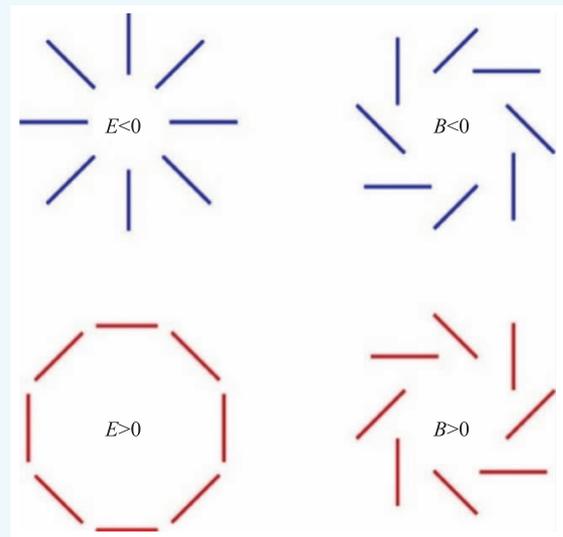


图3 E模式和B模式的偏振图像

偏振的重要因素。但是仅有散射还不够，要产生偏振，散射时入射到电子上的辐射场必须是非均匀的，以电子为中心，入射辐射场的各向异性必须有非零的四极矩。复合期时的光子—重子流体中存在的密度(标量)扰动和张量扰动(引力波)都可以生成电子周围辐射场的四极矩(矢量扰动由于在膨胀的宇宙中迅速衰减，可以忽略不计)。重要的是，只有引力波的存在才会有CMB的B模式偏振的产生，而标量扰动却没有这种功能。因而CMB的大尺度B模式偏振就成为原初引力波的独特信号。

### 3 非奇异宇宙模型

无论热大爆炸还是暴胀宇宙学都存在一个固

有的理论疑难,即:我们的宇宙创生于一个时空奇点。根据霍金和彭罗斯在1970年代的证明<sup>[12, 13]</sup>,宇宙大爆炸的开端必然存在一个能量密度无穷大,时空曲率无穷大的奇点,此刻所有已知的物理规律都会失效。该问题在暴胀宇宙学中依然存在<sup>[14, 15]</sup>。这就促使物理学家去寻找暴胀宇宙学之外

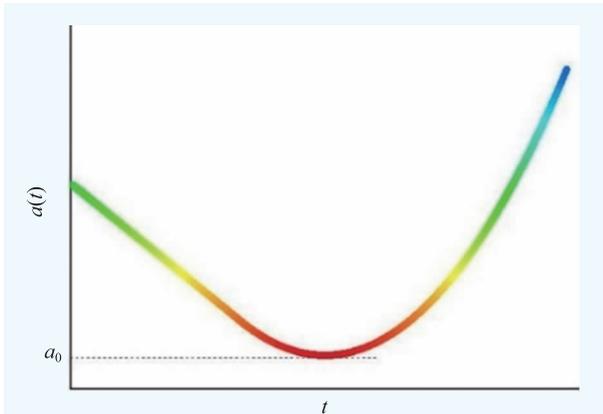


图4 反弹宇宙学中标度因子随时间的演化

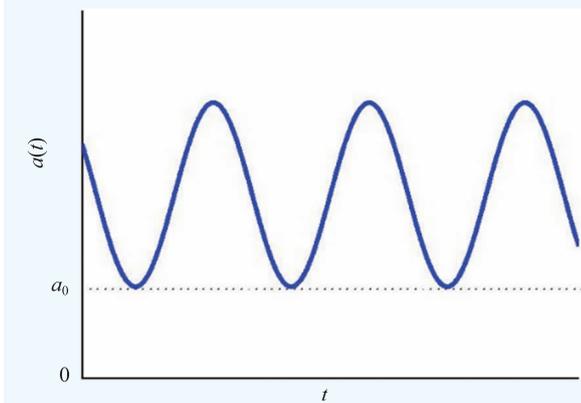


图5 循环宇宙学中标度因子随时间的演化

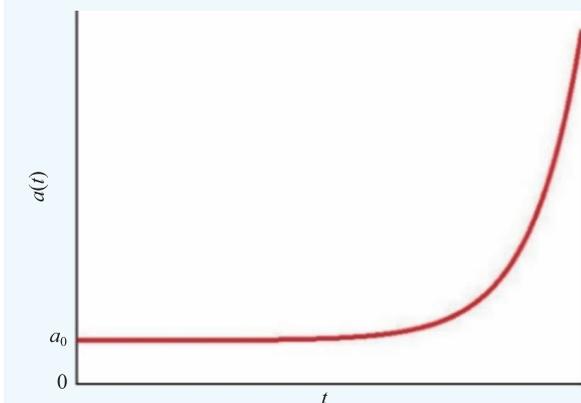


图6 浮现宇宙学中标度因子随时间的演化

的其他极早期理论,其中的候选者包括反弹宇宙学<sup>[16, 17]</sup>、循环宇宙学<sup>[18, 19]</sup>、浮现宇宙学模型<sup>[20-22]</sup>等。

在热大爆炸和暴胀模型中,宇宙是在不断膨胀的,也就是说,如果从某个时刻开始向前回溯的话,宇宙的尺度 $a$ 将不断减小,直到达到奇点为止。而在反弹宇宙学模型中,我们会得到一个不一样的图像:一开始, $a$ 也不断减小;但在减小到某个尺度 $a_0$ 时, $a$ 又开始增大。换言之,反弹宇宙学认为,宇宙尺度的演化是一个收缩—反弹—膨胀的过程:宇宙收缩到某个尺度 $a_0$ 时,就转而开始膨胀了(图4)。

另一类非奇异宇宙学是循环宇宙。循环宇宙相当于经历了多次收缩和膨胀,在整个演化过程中,标度因子 $a$ 始终大于零(图5)。

还有一种能够避免原初奇点问题的图像是浮现宇宙学。如图6所示,在浮现宇宙学里,宇宙在极早期是准静态的,它可以近似由闵可夫斯基时空来描述;随着时间演化,它后来过渡到一个膨胀宇宙。在浮现宇宙里往前回溯,宇宙的标度因子 $a$ 不断减小,它会最终趋于一个非零的正值 $a_0$ ,因此避免了原初奇点。如果宇宙最初的尺度大于普朗克长度,我们就能够很有信心地采纳广义相对论,而无需担心量子引力的修正。

以上三种宇宙都能够避免热大爆炸和暴胀模型所面临的原初奇点问题,那么应该如何构造这些宇宙学模型呢?构造非奇异宇宙学模型的关键在于破坏奇点定理的条件,其中最常见的办法是破坏能量条件或者修改爱因斯坦的广义相对论<sup>[16, 17]</sup>。由于我们不知道完整的量子引力理论的数学形式,在广义相对论和四维时空框架下研究非奇异宇宙学是非常有益的。

具有精灵(quintom)<sup>[23]</sup>性质的有效场论是构造上述非奇异宇宙学模型的关键。精灵场是指状态方程能够越过 $-1$ 的场,它最早是由中国科学院高能物理研究所张新民研究员等在研究暗能量时提出来的<sup>[23]</sup>,在国际上受到了非常广泛的关注。精灵有效场状态方程越过 $-1$ 的性质破坏了奇点定理的零能量条件(能量与压强之和大于零)<sup>[16]</sup>,因此能够被用来研究非奇异宇宙学。事实上,对

于反弹宇宙和循环宇宙，反弹点的哈勃参数等于零，哈勃参数的时间导数大于零，因此，

$$\dot{H} = -4\pi G(\rho + p) > 0 \Rightarrow w = \frac{p}{\rho} < -1,$$

即在反弹点零能量条件被破坏。对于浮现宇宙学，当  $t \rightarrow -\infty$  时，同样需要零能量条件的破坏。另一方面，宇宙在经历非奇异演化(反弹、循环或者浮现)之后，过渡到大爆炸宇宙学，宇宙的状态方程将大于  $-1$ 。因此，状态方程越过  $-1$  的精灵性质是非奇异宇宙学模型构造的必要条件。值得指出，文献中流行的 Ekpyrotic 模型<sup>[24, 25]</sup>，因其模型不具有状态方程越过  $-1$  的精灵性质，所描述的反弹仍是奇异的。从理论上实现精灵性质比较困难，最容易想到的是双场模型<sup>[23]</sup>。张新民研究团队证明过一个止步定理(no-go theorem)：即在爱因斯坦理论框架下，无高阶导数的单标量场以及单流体模型不具有精灵性质<sup>[16, 26]</sup>。因此为了实现单场精灵模型，人们一般会考虑带高阶导数的场论模型，如类似 Lee-Wick 模型<sup>[27]</sup>，Galilean 模型<sup>[28]</sup>，或者考虑修改引力<sup>[29]</sup>。

除了暴胀模型，非奇异宇宙学模型(反弹宇宙模型、循环宇宙模型、浮现宇宙学模型)也能够产生出符合观测的原初密度扰动，解释了宇宙大尺度结构以及 CMB 中的各向异性。对于反弹/循环宇宙学而言，在以下两种情形下，曲率扰动出视界会给出标度不变的原初功率谱：宇宙经历了状态方程等于 0 的收缩相，或者经历了  $\epsilon \equiv d(1/H)/dt \gg 1$  的收缩相(Ekpyrotic 模型)<sup>[24, 25]</sup>。浮现宇宙学的标度因子如果满足  $a \sim \exp[(t_0 - t)^{-4}]$ ，则原初功率谱也是标度不变的<sup>[22, 30]</sup>。除去上述所有可能性，另外的可能是宇宙经历了非奇异演化(反弹/循环/浮现)以后，再经历一段暴胀，这样宇宙的演化既不是奇异的，又继承了暴胀宇宙学的优点，给出标度不变的原初功率谱。这样的例子包括反弹暴胀宇宙学<sup>[31, 32]</sup>、浮现暴胀宇宙学<sup>[33]</sup>等模型。还有一类在非奇异宇宙学里得到标度不变原初功率谱的办法是利用曲率子机制<sup>[34]</sup>。

相比于暴胀，非奇异宇宙学模型给出的原初引力波更加复杂，甚至不是标度不变的(对于非标

度不变的原初引力波，张标比  $r$  就不再是一个很好的物理量)。在爱因斯坦引力理论框架下，引力波的演化方程可以约化为

$$v_k'' + \left(k^2 - \frac{a''}{a}\right)v_k = 0,$$

只有在  $a \sim |t|^{-1}$  (暴胀)或者  $a \sim t^2$  (收缩相的状态方程等于 0 的反弹宇宙)两种情形下，才会给出标度不变的原初引力波。暴胀预言的张量谱指数和张标比  $r$  之间满足一致性关系<sup>[35]</sup>：

$$n_t = -r/8.$$

收缩相的状态方程等于 0 的反弹宇宙预言  $n_t$  几乎严格为 0<sup>[36]</sup>；Ekpyrotic 模型不能给出标度不变的原初引力波，事实上它给出的是蓝谱<sup>[24, 25]</sup>：

$$n_t > 0.$$

另外，反弹暴胀模型在一定程度上继承了暴胀模型的性质，它预言的原初引力波的大小与暴胀模型一致，但由于反弹，一般而言其功率谱存在着随  $k$  振荡的行为<sup>[37]</sup>。

浮现宇宙学本身预言的原初引力波也是标度变化的，因为它的标度因子在极早期几乎为常数；浮现暴胀宇宙学的暴胀阶段能够产生标度不变的原初引力波，而在大尺度上，它被压低的<sup>[38]</sup>。

现在的 CMB 观测仅仅只是发现原初密度扰动是标度不变的，而原初引力波迟迟未有被观测到，其功率谱随尺度的演化行为更是未知。因此，未来的原初引力波探测实验将是甄别暴胀和非奇异宇宙学模型(反弹宇宙学、循环宇宙学、浮现宇宙学模型)的关键所在。

## 4 原初引力波探测和阿里计划

2014 年 3 月，美国哈佛大学领导的 BICEP2 合作组宣布测量到 CMB 的 B 模式偏振信号，可能来自宇宙早期产生的原初引力波，引起了世界科学界的震动。遗憾的是，此后空间望远镜的进一步研究发现，BICEP2 观测的天区受到较强银河系本身的“前景”辐射干扰，无法确证信号来源于早期宇宙。这一结果激发了人们对 CMB 观测研究的新思考：进一步改进探测器灵敏度，实现

南北全天覆盖提高信噪比和相互验证,寻找“最干净”的天区降低银河系辐射干扰,迫在眉睫。

迄今为止已经建造和正在规划中的地面CMB望远镜,集中在智利天文台和美国南极极点科考站两个台址,而北半球是空缺的。2014年5月,中国科学院高能物理研究所领导的研究团队提出基于我国西藏阿里天文台开展CMB观测,探测原初引力波。阿里天文台位于我国西藏阿里地区狮泉河镇以南约30 km处,海拔5100 m的山脊。这里海拔高、云量少、水汽低、透明度高,是北半球仅有的适合观测CMB原初引力波,同时具备望远镜建设与运行基础的台址。通过过去两年

的研究,国际上已公认阿里是目前已知北半球最佳的CMB观测台址。

阿里原初引力波实验是中国科学院高能物理研究所领导的国内多家单位参加的中美合作项目,计划在未来三到五年内建设出我国第一个世界先进水平的CMB实验平台,在北天区实现对原初引力波的首次观测,同时参加由哈佛大学领导的、将在南极极点科考站升级建设的BICEP4实验。形成一南(美国主导、中方参加)一北(中方主导、美方参加)的地面CMB实验对原初引力波观测的全天区覆盖,探知宇宙起源奥秘,检验国际以及国内宇宙学家提出的理论预言。

## 参考文献

- [1] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116 (6):061102
- [2] Ade P A R *et al.* (Planck Collaboration). arXiv: 1502.01589 [astro-ph.CO]
- [3] Guth A H. Phys. Rev. D, 1981, 23:347
- [4] Linde A D. Phys. Lett. B, 1982, 108:389
- [5] Albrecht A, Steinhardt P J. Phys. Rev. Lett., 1982, 48:1220
- [6] Starobinsky A A. Phys. Lett. B, 1980, 91:99
- [7] Sato K. Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 1981, 195:467
- [8] Fang L Z. Phys. Lett. B, 1980, 95:154
- [9] Grishchuk L P. JETP, 1975, 40:409
- [10] Starobinsky A A. JETP Lett., 1979, 30: 682; Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz., 1979, 30: 719
- [11] Rubakov V A, Sazhin M V, Veryaskin A V. Phys. Lett. B, 1982, 115:189
- [12] Penrose R. Phys. Rev. Lett., 1965, 14:57
- [13] Hawking S W, Penrose R. Proc. Roy. Soc. Lond. A, 1970, 314: 529
- [14] Borde A, Vilenkin A. Phys. Rev. Lett., 1994, 72:3305
- [15] Borde A, Guth A H, Vilenkin A. Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 151301
- [16] Cai Y F, Saridakis E N, Setare M R *et al.* Phys. Rept., 2010, 493:1
- [17] Battefeld D, Peter P. Phys. Rept., 2015, 571:1
- [18] Steinhardt P J, Turok N. Phys. Rev. D, 2002, 65:126003
- [19] Xiong H H, Cai Y F, Qiu T *et al.* Phys. Lett. B, 2008, 666:212
- [20] Ellis G F R, Maartens R. Class. Quant. Grav., 2004, 21:223
- [21] Ellis G F R, Murugan J, Tsagas C G. Class. Quant. Grav., 2004, 21:233
- [22] Piao Y S, Zhou E. Phys. Rev. D, 2003, 68:083515
- [23] Feng B, Wang X L, Zhang X M. Phys. Lett. B, 2005, 607:35
- [24] Khoury J, Ovrut B A, Steinhardt P J *et al.* Phys. Rev. D, 2001, 64:123522
- [25] Khoury J, Ovrut B A, Seiberg N. Phys. Rev. D, 2002, 65: 086007
- [26] Zhao G B, Xia J Q, Li M *et al.* Phys. Rev. D, 2005, 72:123515
- [27] Cai Y F, Qiu T T, Brandenberger R *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 80:023511
- [28] Qiu T, Evslin J, Cai Y F *et al.* JCAP, 2011, 1110:036
- [29] Nojiri S, Odintsov S D. Phys. Rev. D, 2005, 72:023003
- [30] Liu Z G, Piao Y S. Phys. Lett. B, 2013, 718:734
- [31] Piao Y S, Feng B, Zhang X M. Phys. Rev. D, 2004, 69:103520
- [32] Wan Y, Qiu T, Huang F P *et al.* JCAP, 2015, 1512(12):019
- [33] Piao Y S, Tsujikawa Shinji, Zhang X M. Class. Quant. Grav., 2004, 21:4455
- [34] Cai Y F, Wan Y, Zhang X. Phys. Lett. B, 2014, 731:217
- [35] Riotto A. arXiv: hep-ph/0210162
- [36] Cai Y F, Chen S H, Dent J B *et al.* Class. Quant. Grav., 2011, 28:215011
- [37] Cai Y F, Qiu T T, Xia J Q *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 79:021303
- [38] Liu Z G, Li H, Piao Y S. Phys. Rev. D, 2014, 90(8):083521