

# 高频引力波与现代宇宙学<sup>\*</sup>

李芳昱<sup>†</sup> 文 毫 方祯云

(重庆大学物理学院 重庆 400044)

**摘 要** 文章简要综述了由典型现代宇宙学模型和膜振荡模型预期的微波频带的高频引力波的特性和可能的观测方案,以及研究这一课题的重要科学意义和所面临的挑战和机遇。

**关键词** 高频引力波,现代宇宙学模型,膜振荡模型,高频引力波的观测

## High-frequency gravitational waves and contemporary cosmology

LI Fang-Yu<sup>†</sup> WEN Hao FANG Zhen-Yun

(College of Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** We briefly review the features and possible schemes for observing high-frequency gravitational waves in the microwave band, which are predicted by typical contemporary cosmological models and brane oscillation scenarios. The deep significance as well as the challenges and opportunities facing us in this project are also reviewed.

**Keywords** high-frequency gravitational wave, contemporary cosmological models, brane oscillation models, observation of high-frequency gravitational waves

### 1 引言

近些年来,随着天文观测和空间技术的迅速发展,爱因斯坦广义相对论的许多重大预言都相继被实验观测所证实.除了人们熟知的水星近日点的进动,光线在引力场中的弯曲,引力红移以及雷达回波的延迟等重要实验观测结果外,广义相对论在相对论天体物理和宇宙学领域中的系列重要预言,也相继获得了观测上的认证,或者相关的物理效应已经开始露出端倪<sup>[1]</sup>.然而,唯独引力波是一个例外.到目前为止,除了对脉冲双星(如 PSR1913+16)的引力辐射阻尼所引起的轨道周期变率的观察,提供了引力波存在的间接证据外<sup>[2-4]</sup>,引力波的直接探测可以说还没有实质性的突破.

广义相对论的大多数验证,可以说多是静态或准静态的.而引力波则是非静态的引力效应,而强引力辐射则既是非静态又是非线性的引力效应.加之引力波效应本身的极其微弱性和不可屏蔽性,这无疑在理论研究,特别是在在实验观测上都带来了巨大的困难.由于引力波是爱因斯坦广义相对论(也包

括其他一些有竞争力的相对论引力理论)的直接预言,除了它的非静态和非线性效应外,其检测精度的要求一般也远高于对其他引力效应的验证.因此可以说,对引力波的直接探测,将是对广义相对论最直接、最严格的终极检验.

从上世纪 60 年代起,全世界对引力波的研究,特别是实验观测,可以说付出了巨大的代价和艰辛的努力.其中包括涉及引力波的系列重大理论问题的相继解决,以及系列实验观测基地的建成.实验探测系统包括传统的质量谐振探测器(通常称为 Weber 棒,以纪念第一个设计引力波探测器的先驱科学家 Weber 教授),巨型激光干涉引力波天文台(其中包括美国的 LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observation),欧洲的 Virgo, GEO600 和日本的 TAMA 等)<sup>[5-7]</sup>.此外,对引力波在宇宙微波背景(cosmic microwave background, CMB)上可能产生的极化效应的间接观测<sup>[8]</sup>也引起

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:11075224)、中国工程物理研究院  
科学基金(批准号:2008T0401;2008T0402)资助项目

2012-07-05 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email:fangyuli@cqu.edu.cn

了人们的关注. 在低频探测范围, 目前还有酝酿中的空间引力波探测方案, 如美欧合作的激光干涉空间引力波天线 (laser interferometer space antenna, LISA) 方案<sup>[9]</sup> 和中欧合作的天体动力学 (ASTROD) 方案<sup>[10,11]</sup> 等. 空间引力波探测方案的尺度远大于地面的观测方案, 而且由于避免了地面多种环境噪声的干扰, 其灵敏度和探测环境都将有很大的改进, 它们主要是探测频率小于 1 Hz 的低频引力波. 但由于空间探测方案昂贵的建设成本, 加之欧美近些年来所面临的金融问题, 空间探测方案有可能大大推迟, 甚至面临流产的命运<sup>[12,13]</sup>. 但无论是已经运行的引力波探测装置还是拟议中的探测方案, 它们都展现了在探索自然界和认识宇宙征途中人类出色的创造力和非凡的智慧.

## 2 现代宇宙学中的原初引力波

和通常的天体引力波 (其频带通常分布在  $10^{-7}$  Hz 到  $10^3$  Hz 的范围) 不同, 对宇宙大爆炸 (big-bang) 理论的进一步发展、完善和细化而建立的宇宙暴涨模型 (inflationary models), 则预期了宇宙在大爆炸后的一个急剧的暴涨期, 这一过程中猛烈的量子涨落为原初引力波 (primordial gravitational waves, 也称为遗迹引力波 (relic gravitational waves)) 的产生注入了巨大的能量<sup>[8,14]</sup>. 上述原初引力波的频带范围则从几乎接近哈勃频率的极低频带 ( $\sim 10^{-18}$  Hz) 延伸到  $10^{10}$  Hz 的高频截止范围<sup>[9,15]</sup> (见图 1).

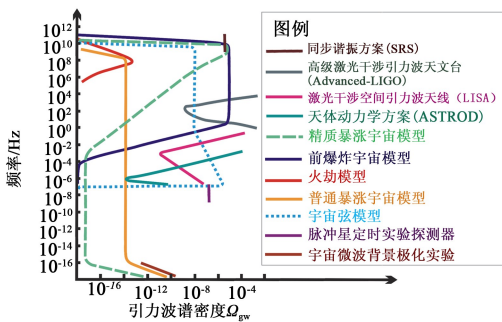


图 1 由前爆炸宇宙模型、精质暴涨宇宙模型、火劫模型、宇宙弦模型和普通暴涨宇宙模型预期的原初引力波谱密度  $\Omega_{gw}$  的上限, 以及可能的探测方案. 该图表明, 前爆炸宇宙模型、精质暴涨宇宙模型和火劫模型预期的原初引力波背景包含了较多的高频成分, 但它们的峰值和峰值宽度却有较大的差别 (上述曲线分别引自文献<sup>[9,11,15,16,17,32]</sup>)

遗憾的是, 目前几乎所有的地面引力波探测器的灵敏度, 均不足以直接探测到上述普通暴涨模型

所预期的原初引力波. 这一方面是因为原初引力波背景的随机性质而导致的困难; 另一方面是由于其无量纲的振幅上限均小于目前各种地面引力波探测器的灵敏度 (见图 1). 此外, 前爆炸宇宙模型 (pre-big-bang model)<sup>[9,15,16]</sup>, 精质暴涨宇宙模型 (quintessential inflationary model)<sup>[17,18]</sup>, 火劫模型 (ekpyrotic scenario)<sup>[16]</sup> 和宇宙弦模型 (cosmic string model)<sup>[9]</sup> 均预期了宇宙学范围的原初引力波. 如果把这些模型预期的原初引力波和膜振荡模型 (brane oscillation models)<sup>[19,20]</sup> 预期的宇宙学范围的引力波均作为今后可供观测的候选者 (包括直接探测和间接观察), 则它们所提供的宇宙学范围的引力波的频谱分布, 将比普通天体引力波的频带范围要广阔得多<sup>[9,15,16-21]</sup>.

值得关注的是, 前爆炸宇宙模型和宇宙弦模型预期的原初引力波的谱密度上限在中频范围 (约 100 Hz 附近), 却处在 Advanced-LIGO 的灵敏度范围内, 宇宙弦模型预期的原初引力波谱密度上限在低频段 (从  $10^{-7}$  Hz— $10^{-3}$  Hz 的范围), 又处在 LISA 和 ASTROD 的灵敏度范围内<sup>[9,11]</sup> (见图 1). 因此, 如果 Advanced-LIGO, LISA 和 ASTROD 今后可供实施, 则上述两个频带将可能是有希望的探测窗口.

## 3 宇宙原初引力波中的高频成分和谱密度

上世纪末以来, 一些典型的热点宇宙学模型均预期了微波频带的高频引力波, 从而有可能大大拓宽人类观测宇宙的视野. 其中, 前爆炸宇宙模型预期的原初引力波在  $10^9$  Hz— $10^{11}$  Hz 范围的无量纲谱密度的上限, 已达到  $\Omega_{gw} \sim 6.9 \times 10^{-6}$ <sup>[9]</sup>. 精质暴涨宇宙模型在  $10^9$  Hz 的频带的谱密度的上限, 几乎与前爆炸宇宙模型处于同一量级, 但其峰值频带宽度要小得多<sup>[17,18]</sup> (见图 1). 基于额外维理论的膜振荡模型所预期的高频引力波已延伸至  $10^{12}$  Hz 甚至更高的频带<sup>[19]</sup>. 由于上述高频引力波的谱密度或无量纲的振幅均比普通暴涨宇宙模型中的原初引力波要高出 7—8 个量级, 因而对这些高频引力波的研究已越来越引起人们的关注<sup>[9,12,16-22]</sup>.

此外, 火劫模型 (这实际上是一种膜宇宙的碰撞模型)<sup>[16]</sup>、电磁波与天体等离子体或天体磁场的相互作用、原初黑洞的蒸发<sup>[23]</sup> 以及天体热等离子体振荡<sup>[24]</sup> 等均可能产生微波频带甚至更高频率的引力

波. 但这些高频引力波的强度(谱密度或无量纲的振幅)一般都远小于目前已有的高频引力波探测器的灵敏度. 因此, 对上述引力波的观测, 一般寄希望于在宇宙微波背景上留下的间接效应.

#### 4 高频引力波的观测

Press 和 Thorne 将频率大于  $10^5$  Hz 的引力波定义为高频引力波<sup>[25]</sup>. 倪维斗给出了一个较为详细的引力波的频谱分类和不同频带的探测方案的评述<sup>[26]</sup>, Grishchuk 专门对原初引力波的频带分类和探测方案做过评述<sup>[14]</sup>. 张扬和童明雷对宇宙高频原

初引力波源和探测手段做过综述和讨论<sup>[21]</sup>, 其中包括目前进行中的中美高频引力波科学团队的合作研究方案.

目前国际上已经建成的高频引力波探测器有英国伯明翰大学的环形波导方案<sup>[27]</sup>, 意大利国家核物理中心的双球型腔耦合方案<sup>[28]</sup>以及日本东京大学建成的小型激光干涉仪探测器<sup>[29]</sup>. 处于理论研究阶段的有以 Braginsky 原型为基础的环形波导方案(某些方面与伯明翰大学的方案相似)<sup>[30]</sup>, 巨型环型腔和圆柱谐振腔的耦合方案(Grishchuk—Sazhin 方案)<sup>[31]</sup>, 以及中美高频引力波科学团队的高斯型微波光子流的同步谐振方案<sup>[32-38]</sup>(见表 1).

表 1 国际上几种典型的高频引力波电磁探测方案

	英国伯明翰大学的 环形波导方案 (已运行) <sup>[27]</sup>	意大利国家核物理 中心的双球型耦合腔 方案(已运行) <sup>[28]</sup>	俄罗斯的超导腔 —静磁场耦合方案 (理论研究阶段) <sup>[31]</sup>	高斯型微波光子流的 谐振响应方案(中美 合作方案, 理论研究 阶段) <sup>[32, 35, 37, 38]</sup>
响应频率	$\sim 10^8$ Hz	$\sim 10^8$ Hz	$\sim 10^7$ Hz— $10^8$ Hz	$\sim 10^9$ Hz— $10^{12}$ Hz
典型尺度	$\sim 1$ m	$\sim 1$ m	$\sim 10$ m	$\sim 1$ m
背景场功率	$\sim 10$ W	$\sim 10$ W	$\sim 10^6$ W	$\sim 10$ W
背景静磁场	无	无	$\sim 30$ T	$\sim 3$ T
运行温度	室温	$< 0.01$ K	$< 0.001$ K	$< 0.1$ K
显示方式	电磁筒正模极化 矢量的旋转效应	差频谐振时双球型 腔间电磁能量的转换	扰动光子数 (二阶效应)	自由空间中的 扰动光子流(一阶效应)
灵敏度	$\sim 10^{-16} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目前已达到的灵敏度)	$\sim 10^{-20} / \sqrt{\text{Hz}}$ (目前已达到的灵敏度)	$\sim 10^{-30} - 10^{-33} / \sqrt{\text{Hz}}$ (理论预期值)	$\sim 10^{-26} - 10^{-30} / \sqrt{\text{Hz}}$ (理论预期值)
标准量子 极限	尚不清楚	尚不清楚	$\delta h \sim 10^{-33}$	$\delta h \sim 10^{-32} - 10^{-34}$
进一步改进 的可能途径	低温运行, 提高 Q 值, 典型尺度增大到 10 m 或更大, 探测频率调谐 到 $10^5$ Hz	提高 Q 值, 增大尺度	采用压缩量子态 (非常困难, 技术 上将面临巨大的 挑战)	利用三维分形和 吸收微波光子流的 “黑体材料”, 与超导腔 谐振方案的优化耦合

对于宇宙学范围的原初引力波, 即使在微波频段范围, 一般也是较低的频带对应着较大的振幅. 因而英国、意大利、日本方案中的探测频带均处在  $10^8$  Hz 或更低的范围. 这一方面是因为这些探测方案在其探测频带范围内的可供检测的信号, 主要取决于引力波的振幅而非频率. 从设计上看, 上述频带恰好处于其最佳的谐振区域; 但另一方面, 由前爆炸宇宙模型<sup>[9, 16]</sup>、精质暴涨宇宙模型<sup>[17, 18]</sup>、膜振荡模型<sup>[19]</sup>以及某些热引力波(thermal gravitational waves)模型<sup>[39]</sup>预期的引力波频带已经延伸到了

$10^9$  Hz— $10^{12}$  Hz 甚至更高的范围. 上述高频范围实际上包含了丰富的宇宙学信息. 如果不能对上述频带的高频引力波进行有效的观测, 则意味着我们将留下一个很大的“探测盲区”, 从而丢失了大量丰富的宇宙学信息, 这是非常遗憾的.

近些年来, 中美高频引力波科学团队的研究工作, 已经将关注的频带延伸到了  $10^9$  Hz— $10^{12}$  Hz<sup>[32-38]</sup>. 这主要是因为: (1) 其中  $10^9$  Hz— $10^{10}$  Hz 恰好是前爆炸宇宙模型<sup>[9, 16]</sup>和精质暴涨宇宙模型<sup>[17, 18]</sup>所预期的原初引力波谱密度的峰值区;

(2)在中美的同步谐振方案(synchro-resonance scheme, SRS)中,信号光子流的强度不仅取决于高频引力波的振幅,而且取决于它们的频率,即非常高的频率可以对其微小的振幅进行有效的补偿;(3)在SRS的局部特定区域,信号光子流和背景噪声光子流具有非常不同的物理行为,包括它们的分布、传播方向、极化、相位、衰减率以及波阻抗等<sup>[35,37,38]</sup>,从而大大提高了分辨它们的可能性.这使得其预期的灵敏度完全处在所允许的标准量子极限(standard quantum limit)的范围之内<sup>[40]</sup>; (4)SRS系统还具有小型化(米的量级)、低成本、前瞻性、较高的灵敏度和较短的建设周期等优点.因此,SRS系统在探测频带和探测方式上,将和其他频带的引力波的观测形成很好的互补性(见表1).

当然,即使按照某些宇宙学模型的乐观估计,在 $10^9$  Hz至 $10^{10}$  Hz频带的原初引力波的无量纲振幅也只有 $10^{-29}$ 至 $10^{-30}$ 左右<sup>[9,17]</sup>.上述引力波在SRS系统中的有效接受面上产生的信号光子流,其理论上的预期值大约为每秒500至1000个微波光子<sup>[37]</sup>,而背景光子流则要大出好些个数量级.这意味着即使利用在SRS系统中信号光子流和背景光子流间非常不同的物理行为,也需要 $10^5$  s至 $10^6$  s的信号积累时间<sup>[36,38]</sup>.为降低热噪声,在 $10^9$ — $10^{10}$  Hz频带,需要将运行温度降至0.14K甚至更低.此外,除了背景光子流噪声外,上述频带中的其他噪声(如散粒噪声、衍射噪声、Johnson噪声、黑背景噪声等)都是面临的巨大挑战和需要认真研究的问题<sup>[37]</sup>.然而,由于SRS系统预期的灵敏度完全在其标准量子极限的范围之内,这意味着SRS所面临的问题和挑战并非来自基本原理上的限制,而是技术和工艺上的困难,这些问题和困难则有望通过技术上的进步和创新来加以克服.

膜振荡模型<sup>[19]</sup>预期的在 $10^{10}$  Hz到 $10^{12}$  Hz频带的引力波振幅比前爆炸宇宙模型及精质暴涨宇宙模型预期的还要大一些,但由于预期的重引力子(massive gravitons)具有非零的等效质量,这与欧洲强子对撞机(LHC)中可能产生的高能重引力子具有某些类似的性质<sup>[41]</sup>.对于这种重引力子效应,广义相对论中传统的引力波的横向无迹规范条件和坐标条件都将需要作相应的修正,上述重引力子的传播形式以及由此产生的弯曲时空背景也将与传统的引力波有所不同.因此,对这种重引力子的观测将是一个值得研究的新课题.

对上述微波频带的高频引力波的探测,在实验

上还涉及到极弱信号检测、强磁场技术、真空技术、隔振技术、低温物理、微波技术、电磁兼容技术等<sup>[37]</sup>.可以预期,即使在高频引力波探测本身尚未获得实质性突破之前,这一研究也必将有力地促进这一基础研究和高新技术间的交叉,并将产生一系列高新技术的“副产品”,包括它们在物理学、电子学和空间技术等方面的延伸和应用.

## 5 观测高频引力波的科学意义

引力波与物质的作用截面远小于电磁波与物质的作用截面,因而它几乎能携带最古老也最遥远的宇宙学信息,这是电磁波甚至中微子所不能比拟的.由于现今所知的所有物质形态对引力波来讲都几乎是“透明”的,因此一旦能直接探测到引力波,将为人揭示自然界和认识宇宙打开一个全新的窗口.它还可使人类直接确定黑洞和其他致密天体,并使人们的观测视野从过去的光学频带向微波、红外、紫外、X射线延伸,再扩展到那些“看不见”的物理过程的观测,从而可望开创“引力波天文学”的新纪元.理论上它还涉及到作为时空几何背景的扰动和作为信息及能量传输的动力学机制间的对立统一问题,引力场自身的能量动量的定义及其表述形式,以及引力量子化的前景与命运等问题.

但和通常的天体引力波不同,微波频带的高频引力波主要涉及由典型的宇宙学模型预期的原初引力波,膜振荡模型和欧洲强子对撞机实验中所预期的重引力子效应等,以及其他可能的热引力波效应.

由于原初引力波产生的时间至少比宇宙微波背景要提早大约40万年,因而对原初引力波的观测,除了研究引力波本身的重要科学意义外,它还可能是观测极早期宇宙(特别是宇宙大爆炸后的瞬间)唯一可能的窗口.一旦这方面有实质性的突破,它将可以为各种宇宙学模型的鉴别和判断提供关键性的证据.它还可能使人类对一系列的重大基本科学问题给出更为深刻的判断,包括时间的起点和时间箭头的方向性问题,永恒循环宇宙模型与热力学第二定律的尖锐矛盾,空间的维数和多重宇宙,暗能量的本质,甚至时间、空间更深层次的物理机制的揭示和哲学含义的阐释等.这将可能再次对人类的时空观、运动观、物质观以及宇宙观产生极大的冲击,并又一次使之发生深刻的变革和飞跃.

### 参考文献

- [1] Hawking S W, Israel W. Three hundred years of gravitation,

- General Relativity; An Einstein Centenary Surrey. Cambridge; Cambridge University Press, 1987
- [ 2 ] Hulse R A. Reviews of Modern Physics, 1994, 66: 699
- [ 3 ] Jr. Taylor J H. Reviews of Modern Physics, 1994, 66: 711
- [ 4 ] 唐孟希, 李芳昱, 赵鹏飞等. 云南天文台台刊, 2002, 3: 71  
[Tang M X, Li F Y, Zhao P F *et al.* Publications of The Yunnan Observatoty, 2002, 3: 71 (in Chinese)]
- [ 5 ] Advanced LIGO (2011). <https://www.advancedligo.mit.edu>
- [ 6 ] Freise A *et al.* Class. Quant. Grav. , 2005, 22: S869
- [ 7 ] Takahashi R, TAMA collaboration. Class. Quant. Grav. , 2004, 21: S403
- [ 8 ] Caldwell R R, Kowski M K. Sci. American, 2001, 284: 38
- [ 9 ] Abbott B P *et al.* Nature, 2009, 460: 990
- [ 10 ] Ruediger A. Inter. J. Mod. Phys. D, 2002, 11: 963
- [ 11 ] Ni W T. Proceeding of the 9th Asia-Pacific International Conference on Gravitation and Astrophysics. World Scientific, 2010. 40
- [ 12 ] Baker R M L ( private communication, 2012)
- [ 13 ] Davis E W (private communication, 2011)
- [ 14 ] Grishchuk L P. arXiv: gr-gc/0504018 (2005)
- [ 15 ] Gasperini M, Veneziano G. Phys. Rep. , 2003, 373: 1
- [ 16 ] Veneziano G. Sci. Am. , 2004, 290: 30
- [ 17 ] Giovannini M. Phys. Rev. D, 1999, 60: 123511
- [ 18 ] Giovannini M. arxiv: gr-qc/0807. 4317 (2008)
- [ 19 ] Clarkson C, Seahra S S. Class. Quant. Grav. , 2007, 24: F33
- [ 20 ] Seahra S S, Clarkson C, Moartens R. Phys. Rev. Lett. , 2005, 94: 121302
- [ 21 ] Tong M L, Zhang Y. Phys. Rev. D, 2009, 80: 084022
- [ 22 ] Garcia-Cuadrado G. AIP Conf. Proc. , 2009, 1103: 553
- [ 23 ] Kogun G S B, Rudenko V R. Class. Quant. Grav. , 2004, 21: 3347
- [ 24 ] 温伯格. 引力论与宇宙论. 北京: 科学出版社, 1980 [Weinberg S. Gravitation and Cosmology; Principles and Applications of the General Theory of Relativity. Beijing: Science Press, 1980 (in Chinese)]
- [ 25 ] Press W H, Thorne K S. Annu. Rev. Astro. Astrophys. , 1972, 10: 335
- [ 26 ] Ni W T. Mod. Phys. Letters A, 2010, 25: 922
- [ 27 ] Cruise A M. Class. Quant. Grav. , 2000, 17: 2525
- [ 28 ] Ballantini R *et al.* arxiv: gr-gc/0502054 (2005)
- [ 29 ] Nishigawa A *et al.* Phys. Rev. D, 2008, 77: 022002
- [ 30 ] Mensky M B *et al.* Gravitation and Cosmology, 2009, 15(2): 167
- [ 31 ] Grishchuk L P. arxiv: gr-qc/0504018 (2006)
- [ 32 ] Li F Y *et al.* Phys. Rev. D, 2003, 67: 104008
- [ 33 ] Tong M L *et al.* Phys. Rev. D, 2008, 78: 024041
- [ 34 ] Li F Y, Fr. Baker R M L. Inter. J. Mod. Phys. B, 2007, 21: 3274
- [ 35 ] Li F Y *et al.* Euro. Phys. J. C, 2008, 56: 407
- [ 36 ] Li F Y *et al.* Phys. Rev. D, 2009, 80: 064013. arxiv: re-qc/0909. 4118 (2009)
- [ 37 ] Woods R C *et al.* Journal of Modern Physics, 2011, 2: 498
- [ 38 ] Li J *et al.* General Relativity and Gravitation, 2011, 43(8): 2209
- [ 39 ] Sivaram C, Arun K. arXiv: 0708. 3343 (2011)
- [ 40 ] Stephenson G V. AIP Conference Proceedings, Melville, NY, 2009, 1103: 542
- [ 41 ] Wu X G, Fang Z Y. Phys. Rev. D, 2008, 78: 094002