

# 基于强磁场和弱光子流检测的高频引力波探测系统

李芳昱<sup>1</sup> 文 毫<sup>1</sup> 方祯云<sup>1</sup> 韦联福<sup>2</sup> 王轶文<sup>2</sup> 张 淼<sup>2</sup> 匡光力<sup>3</sup> 谭运飞<sup>3</sup>

(1 重庆大学物理学院 401331; 2 西南交通大学物理科学与技术学院 610031;

3 中国科学院强磁场科学中心 230031)

## 一、引言

2016年2月11日,美国国家自然科学基金委员会,携美国加州理工、麻省理工以及美国的激光干涉引力波天文台(Laser Interferometer Gravitational Wave Observation,简称LIGO)合作团队,发布了LIGO探测到引力波证据的报道。据悉,这是一个来自13亿光年之遥的两个巨大黑洞合并过程产生的中频引力波(频率从35Hz到250Hz),这一引力波在地球上的无量纲的振幅为 $10^{-21}$ 左右。它分别被美国东西部的两台相距为3000千米的LIGO几乎同时测到。如果这一结果最终能被其他方式所佐证,这将是人类对引力相互作用认识过程中具有里程碑意义的重大事件。

更为重要的是,这一重大突破不仅没有终结对引力相互作用的认识,相反,它却开辟了引力波天文学的新纪元,而且由此引发出系列有待进一步探索的重大科学问题。其原因主要有以下几个方面:

1. LIGO探测的引力波,实际上是上述两个黑洞在合并的最后阶段产生的,在LIGO中的持续时间很短。这个“偶发”的高能天体物理事件显然是难以重现的。

2. 上述引力波与可能的引力波频带相比只处在一个非常狭窄的中频频带。因此,对于连续谱的引力波和其他频带以及其他类型的引力波的直接探测,仍是一项极具挑战性的任务。

3. 几乎所有的暴涨宇宙模型均预期了极早期宇宙产生的原初引力波(Primordial gravitational waves)。这种原初引力波的频谱从极低的频带(即接近于哈勃频率的 $10^{-16} \sim 10^{-17}$ Hz)一直延伸到 $10^9 \sim 10^{10}$ Hz的

微波频带。显然,对这种原初引力波的观测,将为验证暴涨宇宙模型提供最直接的证据。

还须指出的是,如果一种引力波具有广阔的频带分布,而且能用不同的方式并在多个频带、多个参量的观测中获得自洽的结果,那将是对这种引力波最为有力的证据和支持。

广义相对论的大多数实验验证,可以说多是静态或准静态的。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。加之探测引力波所需的检测精度一般都远高于其他引力效应的验证。因此,对引力波的直接探测,应该是对广义相对论(包括其他一些相对论引力理论)的最直接、最严格的检验。

自20世纪60年代以来,国际上已建造了多个引力波探测系统,目前的主力阵容为激光干涉引力波探测器(包括美国的LIGO,欧洲的Virgo, GEO, 日本的TAMA, KAGRA, 澳大利亚的AIGO等)。其探测参量主要是引力波的潮汐效应引起的力学位移,探测频带主要分布在 $1 \sim 1000$ Hz。在低频范围(即 $1 \sim 10^{-7}$ Hz范围),目前还有酝酿中的空间引力波探测方案(如eLISA,以及我国的天琴计划和太极计划等)。空间探测方案的原理仍是激光干涉,但因探测系统的分布尺度远大于地面观测方案,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必将大有改观。由于许多高能天体物理事件产生的引力波频率大多分布在上述的中、低频带范围(从 $10^{-7} \sim 1000$ Hz),因而上述地面及空间引力波探测装置所瞄准的目标,可以说包含了丰富的引力波源。另外,

极低频带 ( $10^{-16} \sim 10^{-17}\text{Hz}$ ) 的原初引力波在宇宙微波背景 (Cosmic Microwave Background, CMB) 上产生的极化效应 (即 B- 模式, 因类似于磁感应线的分布, 故因此得名), 也是一个重要的观测窗口 (包括我国的阿里计划)。2014 年 3 月美国关于宇宙泛星系极化背景成像 -2 (BICEP-2) 的 B- 模式的报道, 就属此列。虽然这一结果最终被进一步的实验观测所否定 (主要因为宇宙尘埃的影响)。但它并没有影响在这一频带上的研究, 反而为这一观测方案的改进提供了难得的机遇。

然而, 自 20 世纪末以来, 一些典型的热点宇宙学模型、高能天体物理过程、基于空间的额外维理论的膜振荡模型, 以及一些热引力波模型均预期了频率处在微波频带甚至更高频率的高频引力波, 从而有可能大大拓宽人类观测宇宙视野。其中, 几乎所有的暴涨宇宙模型均预期了频带分布广阔的原初引力波。按照暴涨宇宙模型推测, 在宇宙大爆炸后的一个急剧的暴涨期中, 其猛烈的量子涨落和相变为原初引力波注入了巨大的能量。这种原初引力波随着宇宙膨胀而一直拓展延续到整个空间。特别是其中的前爆炸

宇宙模型 (pre-big-bang model), 精质暴涨宇宙模型 (quintessential inflationary model), 火劫模型 (ekpyrotic scenario), 宇宙弦模型 (cosmic string model) 等, 均预期了原初引力波谱密度 (或振幅) 在高频带的峰值区或部分峰值区 (图 1)。

另外, 天体热等离子体与电磁波的相互作用, 基于空间额外维理论的膜振荡模型 (brane oscillation scenarios) 以及一些热引力波模型所预期的引力波的谱密度 (或振幅) 的峰值区, 已经延伸到了  $10^9 \sim 10^{14}\text{Hz}$  范围。显然, 上述频带已经远远超出了 LIGO 等地面引力波探测装置的探测范围。因此, 为了探测上述高频引力波, 则需要新的原理、方案 and 手段 (见图 1 和表 1)。

## 二、高频引力波的观测

目前国际上已经建成的高频引力波探测装置, 有英国伯明翰大学的环形波导方案, 意大利国家核物理中心的双球形腔的差频耦合方案, 日本京都大学的小型激光干涉仪探测器, 澳大利亚的声学共振腔方

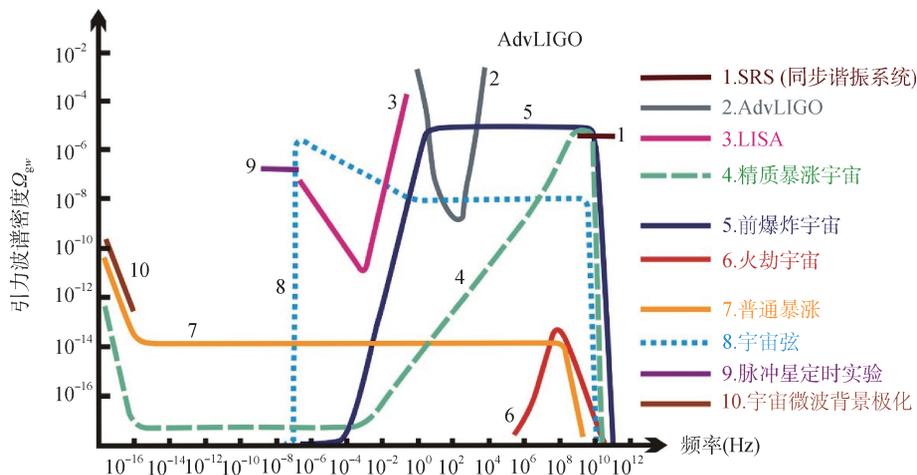


图 1 系列热点宇宙学模型预期的原初引力波的谱密度和相关探测装置的灵敏度

表 1 一些可能的高频引力波源及其主要特征参量

	普通暴涨	精质暴涨	前爆炸	膜振荡	天体热等离子体与电磁波的相互作用
频带	$10^8 \sim 10^9\text{Hz}$	$10^9 \sim 10^{10}\text{Hz}$	$10^7 \sim 10^{11}\text{Hz}$	$10^8 \sim 10^{14}\text{Hz}$	$10^{10} \sim 10^{12}\text{Hz}$
无量纲的振幅	$10^{-30}$ (上限) $\sim 10^{-34}$ , 甚至更小	$10^{-30} \sim 10^{-31}$	$10^{-29} \sim 10^{-31}$	$10^{-22} \sim 10^{-25}$	$10^{-25} \sim 10^{-29}$
特征	随机背景	随机背景	随机背景	离散谱	连续谱

案。处于理论研究阶段的有俄罗斯的以布拉金斯基 (Braginsky) 原型为基础的环型波导方案, 以及巨型超导圆柱谐振腔方案 (Grishchuk-Sazhin 方案)。而处在实验平台建造的前期研究的, 即我们提出的电磁同步谐振系统 (EM synchro-resonance system), 国际同行常称其为三维同步谐振系统 (3DSR system, 或 Li-Baker HFGW detector)。目前, 这一实验平台的前期理论研究和实验设计, 主要由重庆大学、西南交通大学和中科院强磁场科学中心承担。

国际上的高频引力波探测装置大多基于引力波对电磁场的扰动效应 (而不是引力波潮汐效应引起的力学位移)。由于只有在引力波的波长和电磁系统的尺度在可以相比拟的情况下, 才可能产生有效的电磁谐振响应。因此, 只有高频引力波 (其波长在米的量级或更小, 即频率应在微波频带或更高) 才能在实验室尺度下的电磁系统中产生理想的谐振响应。而中低频引力波 (其波长一般为数百千米或更大) 则不可能产生上述效应。显然上述高频引力波的频带已大大超出了 AdvLIGO 和 eLISA 等的探测范围。特别是, 近些年来通过实验观测和理论研究所预期的系列高频引力波源 (见图 1、表 1), 正在不断地进入到主流引力物理和天文观测的视野和观测范围 (例如见 T. Fujita, et al., Phys.Rev.D 89, 103501 (2014), M. Giovannini, Class.Quantum Grav. 31 (2014) 225002, Phys.Rev.D 73, 083505 (2006), J. Ghiglieri and M. Laine, JCAP 07 (2015) 022, A.J.K. Chua, Class.Quantum Grav.32 (2015) 015011, A.M. Cruise, Class.Quantum Grav., (2000), 17: 2525 等)。因此, 高频引力波和中低频引力波在探测频带和方法上将形成很好的互补性。

下面仅对英、意、俄几种典型方案做一简要介绍和评述, 以便将它们与第三节介绍的我们的方案作一比较。

(i) 英国的伯明翰大学的环型波导方案。其探测频率为  $10^8\text{Hz}$ , 它是探测处于谐振频率的高频引力波, 在环型波导中所引起的电磁简正模极化矢量的旋转效应。由于探测器由普通材料建造且在室温下运行, 故其品质因素只有  $5000 \sim 10000$ , 因而已达到的灵敏度只有  $\delta h \sim 10^{-16}$ 。改进后的灵敏度可望将其提升到

$\delta h \sim 10^{-20}$  至  $\delta h \sim 10^{-21}$ 。从目前已有的宇宙学模型来看, 唯有膜振荡模型所预期的高频引力波强度有可能处在其探测范围内, 其他高频引力波的强度 (无论是其能谱密度还是无量纲的振幅) 均小于其灵敏度。

(ii) 意大利国家核物理中心的双球型腔耦合方案。探测频率也为  $10^8\text{Hz}$ 。它是利用差频谐振时 (即两个腔的电磁简正模的差频恰好与引力波频率相等时), 两个球型腔间电磁能量的转换来显示引力波效应的。由于是超导腔且在低温环境下运行, 其品质因素则远高于伯明翰大学的探测器。目前已经达到的灵敏度为  $10^{-19}$  左右, 预期改进后的灵敏度可望达  $\delta h \sim 10^{-22}$  甚至更高。因而探测膜振荡模型预期的高频引力波应该是有希望的, 并有可能接近探测天体热等离子体振荡与电磁波相互作用所产生的高频引力波强度的上限, 但不具备探测高频原初引力波的灵敏度。

(iii) 澳大利亚的声学共振腔探测装置。其探测频带为  $10^7 \sim 10^8\text{Hz}$ 。这一装置仍然是充分利用了声学共振腔高品质因素的优点, 其预期的灵敏度为  $\delta h \sim 10^{-20}$  至  $\delta h \sim 10^{-21}$ , 故探测膜振荡模型的高频引力波是有可能的, 但不能探测高频的原初引力波。

尚处于理论研究阶段的有俄罗斯的环形波导方案和巨型圆柱超导腔与静磁场的耦合方案。其探测频带为  $10^7 \sim 10^8\text{Hz}$ 。后者实际上是一个把超导腔和稳态磁场的典型参量推向极值条件下的探测系统: 例如, 它需要典型尺度达 10 米、且品质因素达  $10^{13}$  的超导腔, 并与一个强度达 30 T 的静态磁场的相耦合; 还需要处在 0.001 K 的低温环境中, 在量子无损检测 (quantum nondemolition measurement) 条件下的预期灵敏度可望达  $\delta h \sim 10^{-33}$ 。但其理论估算与现实建造差距太大, 至少从目前技术条件来看是不现实的。

此外, 还有日本京都大学的小型激光干涉引力波探测器 (其臂长典型尺度为 75cm), 以及美国斯坦福大学的开放超导谐振腔方案。前者由于是小型激光干涉探测装置, 故可望在高频带产生谐振响应, 其探测频带为  $10^8\text{Hz}$ , 灵敏度为  $\delta h \sim 10^{-21}$ 。而后者实际的探测范围为中频带, 但其探测频带的上限可达  $10^5\text{Hz}$ , 这又恰好是高频引力波探测范围的频带下限 (图 2)。其灵敏度在  $\delta h \sim 10^{-20}$  左右。2003 年, 中国科学院高能物理研究所的董东、黄超光还提出过一个用同步辐射的储存

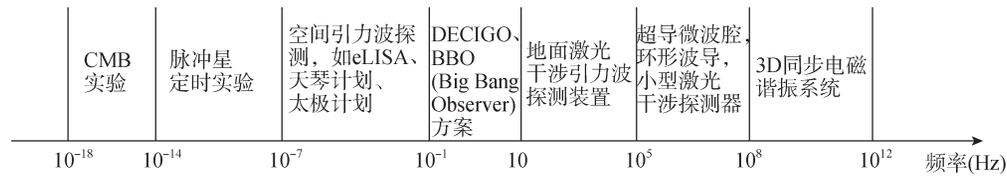


图2 引力波频谱分布和探测方案（参见 W.T. Ni, Mod. Phys. Lett. A, 25(2010), 922。  
Press W H, Thorne K S. Annu. Rev. Astro. Astrophys. (1972), 10: 335）

环中的电子束探测引力波的方案，也属于这一频段（见 Commun.Theor. Phys. 40 (2003) 299 -300）。

### 三、基于强磁场和弱光子流检测的高频引力波探测系统

和上述几种典型的高频引力波探测方案不同，我们提出的三维同步谐振方案，是一个从  $10^9 \sim 10^{14}$  Hz 的宽频带探测系统，其探测原理和方法也与其他高频引力波探测方案有着重要的区别（见后述）。如果得以建成，将可望成为国际上唯一瞄准  $10^9 \sim 10^{14}$  Hz 范围（这恰好是系列热点宇宙学模型和高能天体物理过程所预期的高频引力波能量密度的峰值区域或部分峰值区域）的高灵敏度的探测方案（图2）。

实际上，对于通常的原初引力波，即使在微波频段，一般也是较低的频带对应着较大的振幅，因而英国、意大利和日本方案中的探测频带均处在  $10^8$  Hz 左右。这一方面是因为这些探测方案在其探测频带范围内可供检测的信号，主要取决于引力波的振幅而非频率。从设计上看，上述频带又恰好处在其最佳谐振区域。但另一方面，由前爆炸宇宙模型、精质暴涨宇宙模型、膜振荡模型、天体热等离子体与电磁波的相互作用，以及某些热引力波模型预期的引力波频率已经延伸到了  $10^9 \sim 10^{12}$  Hz 甚至更高频带。而不少宇宙学和高能天体物理过程（如磁星系统的伽玛暴，原初黑洞的蒸发等）产生的引力波还可能发生在极高频的范围。因此，上述高频范围实际上包含了丰富的宇宙学信息和高能天体物理信息。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和高能天体物理信息，那将是非常遗憾的。

三维同步谐振系统的理论基础是弯曲时空中的经典电动力学和量子电子学，探测目标是基于广义相对论（包括其他一些主流的相对论引力理论）、

现代宇宙学和高能天体物理过程所预期的频率处在  $10^9 \sim 10^{12}$  Hz 甚至更高频带的高频引力波（例如见，F. Y. Li, M. X. Tang, D. P. Shi., Phys. Rev. D, (2003) 67: 104008; M. L. Tong, Y. Zhang, F. Y. Li, Phys. Rev. D, (2008) 78: 024041; H. Wen, F.Y. Li, Z.Y. Fang, Phys. Rev. D 89, 104025 (2014); F. Y. Li, H. Wen, Z.Y.Fang, Chin. Phys. B 22: 120402 (2014) F.Y. Li, H. Wen, Z.Y. Fang, arXiv: 1505.06546 (2015) 等)。其原理结构如图3所示，它包括稳态强磁场部分（由中国科学院强磁场科学中心设计）、背景高斯束以及弱光子流探测（由西南交大及重庆大学设计）三大部分。（a）稳态强磁场（10 ~ 12T）。在高频引力波的作用下，将产生二阶扰动光子流（信号光子流）。

（b）背景高斯束。其功能是与二阶扰动光子流产生谐振响应，从而产生更强的一阶扰动光子流。由于同时存在沿高斯束对称轴方向的纵向信号光子流以及垂直于该方向的横向信号光子流，故国际同行也将其称之为三维谐振系统。一旦高斯束被调制在较宽的范围（如  $10^9 \sim 10^{14}$  Hz），则谐振响应和差频响应所对应的信号光子流也将具有这一较宽的频带。因此，这是一个比英、意方案广阔得多的宽频带探测系统。（c）弱光子流探测系统（包括信号数据处理）。高斯束的引入显然对应着大的背景噪声光子流，但利用横向信号光子流和背景光子流在特定区域内非常不同的物理行为（如分布、传播方向、极化、衰减率以及波阻抗等），从而可望达到分辨和甄别它们的目的。

上述探测系统中的超导磁体设计方案及其立体图，可见图4。这一超导磁体全部采用 Nb3Sn CICC 导体制造，再用低温环氧树脂凝固。线圈支撑结构将采用高强玻璃钢筒式结构并在 80K 冷屏处设置热沉以减小支撑漏热。由于是超导磁体，它不仅可以提供一个好的低温环境（以有效地抑制热噪声），而且可大大减少其功率损耗和运行成本。

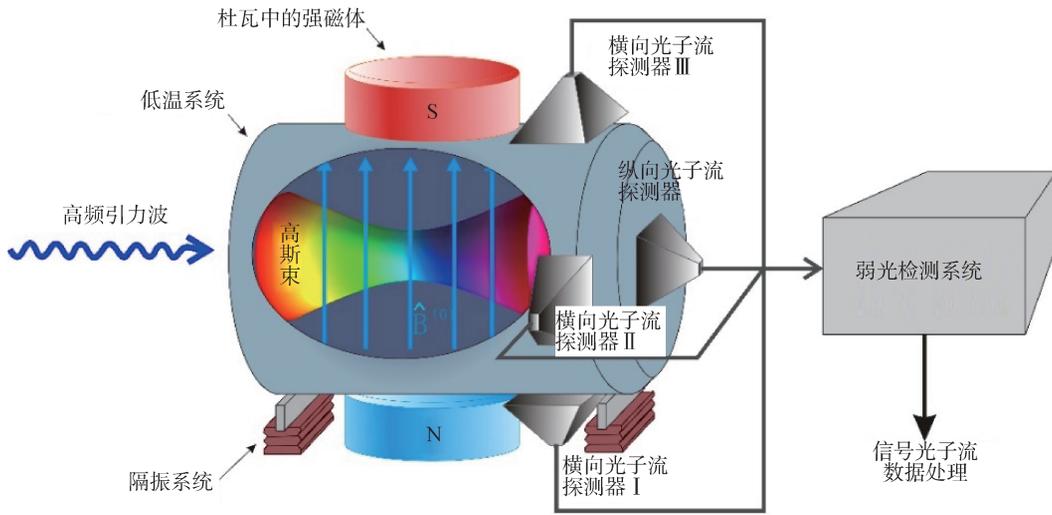


图3 三维同步电磁谐振系统的结构原理图

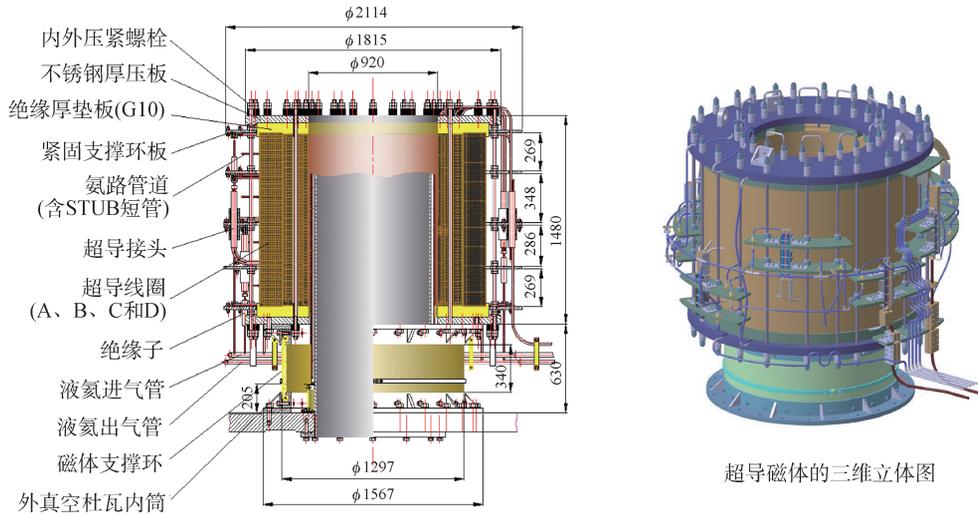


图4 用于高频引力波探测的超导磁体设计方案

三维同步电磁谐振系统的工作原理和技术特点主要体现在以下几个方面：（1）其探测频带瞄准的恰好是普通暴涨宇宙模型的高频带的能谱上限，前爆炸宇宙模型、精质暴涨宇宙模型、膜振荡模型、天体热等离子体振荡以及其他可能的热引力波模型所预期的高频引力波能谱密度（或振幅）的峰值区域或部分峰值区（频带从  $10^9$  到  $10^{14}$  赫兹，因此，这也是一个宽频带的探测方案）；（2）信号光子流的强度与引力波的振幅及频率成双线性关系，因而非常高的频率可以有效补偿其振幅的微弱性；（3）在系统特定的局部区域，由于信号光子流与背景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、衰减率及波阻抗

等（图5），从而大大提高了它们的可分辨性，并使其预期的灵敏度完全处在它的标准量子极限范围之内（例如，见 G. V. Stephenson, AIP Conf. Proc. 1103, (AIP, New York), 542 (2009)）；（4）本系统除了对广义相对论预期的高频引力波传统的  $\oplus$ -型极化和  $\otimes$ -型极化态（它们对应着自旋为2的引力子）具有好的分辨性能外，也可对近期热点讨论的普遍度规理论中所预期的额外极化态（如矢量极化和标量极化，它们分别对应于自旋为1和自旋为0的引力子）进行有效地分辨，这就填补了在高频带分辨引力波额外极化态的空白；（5）这一系统还具有小型化、低成本、前瞻性、较高的灵敏度和较短的建设周期的特点。因而在探测

频带、方式上将与其他频带引力波的观测形成很好的互补性。

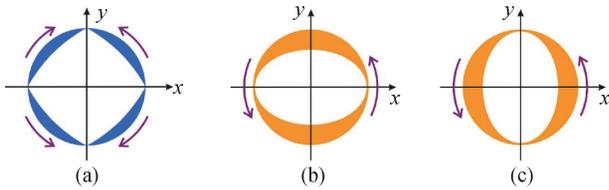


图5 横向背景光子流 (a) 和横向信号光子流 (b)、(c) 强度及传播方向在柱坐标系中的投影。图 (a) 表明横向背景光子流的强度及传播方向并非是完全“左旋”或完全“右旋”的，其最大值位置分别处在  $\pi/4$ ,  $3\pi/4$ ,  $5\pi/4$  及  $7\pi/4$  处。而由引力波的  $\oplus$ -型极化或  $\otimes$ -型极化态产生的横向信号光子流的强度及传播方向则是完全“左旋”或完全“右旋”的。尽管横向背景光子流强度远大于信号光子流，但图 (a)、(b)、(c) 表明，横向背景光子流的零值区（即  $\phi=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  处）恰好为信号光子流的峰值区。另外，两者的波阻抗至少相差 4 至 5 个量级，这就为对它们的分辨和甄别，提供了重要的物理基础

当然，即使按照某些宇宙学模型的乐观估计，在  $10^9 \sim 10^{10}$  Hz 频带的原初引力波的无量纲的振幅也只有  $10^{-29} \sim 10^{-30}$ ，加之原初引力波的随机性质，上述引力波在三维同步谐振系统中的有效接收面上产生的信号光子流，其理论上的预期值仅为每秒大约 500 ~ 1000 微波光子（这虽然是一个很小的光子流通量，但已大于目前技术上最小可探测功率  $10^{-22}$  W）。而横向背景光子流（它是主要的噪声源）的峰值可达每秒  $10^{21}$  左右。即使利用两者在空间分布、传播方向、波阻抗等方面的重要差别，也需要  $10^5$  秒至  $10^6$  秒的信号积累时间。为降低热噪声，在  $10^9 \sim 10^{10}$  Hz 频带的运行温度须降至 1K 甚至更低。而对于膜振荡模型和天体热等离子体振荡产生的在  $10^{12} \sim 10^{14}$  Hz 的高频引力波，由于其振幅至少比原初引力波高出 4 ~ 5 个量级，因而在本系统中预期可达每秒  $10^9$  个信号光子流。而且，随着频率的提高，系统的运行温度则可放宽到 140 K 左右。值得庆幸的是，中科院强磁场科学中心的超导磁体设计，已完全可以达到上述的低温环境以及相应的真空条件。另外，在上述频带中的其他噪声（如散粒噪声、衍射噪声、Johnson 噪声、黑背景噪声及量子噪声等），都远小于背景光子流噪声（参见 G.C. Woods et al., *Journal of Modern Physics*, 2 (2011), 498）。在这种条件下，利用本项目组的

超导量子比特的优化，低温超导微波腔的耦合（ $Q$  值达  $10^6$  和 0.01 K 的运行温度）以及波阻抗匹配技术等，完全可望实现对上述信号光子流的分辨和检测。因此，这一电磁谐振系统完全可望达到探测膜振荡模型（参看图 6 对膜宇宙引力波的一个形象直观的描述）和天体热等离子体振荡所产生的高频引力波的灵敏度。而对高频原初引力波的探测，将面临系列的挑战和困难。然而，由于本系统所预期的灵敏度完全处在标准量子极限的范围之内（包括对高频原初引力波的探测），这意味着它们面临的问题和挑战并非来自基本原理上的限制，而是具体工艺上的困难和问题，后者完全可望通过技术进步和创新来加以克服。

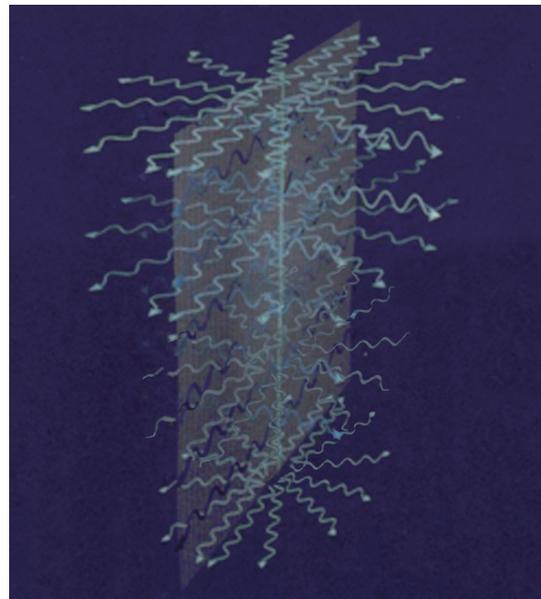


图6 膜宇宙引力波。引力波可以从一个膜宇宙传播到另一个膜宇宙，频率越高，辐射越强。因此，高频引力波很可能是通过空间的额外维度联络两个平行膜宇宙唯一有效的信息通道（参见：霍金，《果壳中的宇宙》）

#### 四、观测高频引力波的科学意义

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暴涨宇宙模型所预期的高频原初引力波，膜振荡模型，天体热等离子体与电磁波相互作用产生的高频引力波，以及其他一些高能天体物理过程有可能产生的高频引力波和潜在的高频引力波源。另外，一些热引力波模型，如原初黑洞的蒸发，磁星伽玛暴甚至欧洲强子对撞机（LHC）中的高能过程还

# 她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

## 欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔

和科苑快讯等栏目。

2016 年《现代物理知识》每期定价 10 元，全年 6 期 60 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。

1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007 ~ 2011 年单行本每期 8 元；合订本每本 50 元；2012 ~ 2013 年单行本每期 9 元，合订本每本 60 元；2014 ~ 2015 年单行本每期 10 元。

预期了极高频带的高频引力波（高能引力子），包括可能的高能重引力子（massive gravitons）效应等。因此，它是天文观测和宇宙学中一个新的重要窗口，并将与中、低频带引力波的观测形成很好的互补性。

三维同步谐振探测装置所瞄准的高频引力波，除了涉及一个全新的空间信息通道和窗口外，其波源和产生机制还涉及下面一些基本的重要科学问题。其中，普通暴涨宇宙模型和前爆炸宇宙模型涉及极早期宇宙和时间起点的问题；精质暴涨宇宙模型涉及暗能量本质的问题；膜振荡模型涉及空间的额外维度、多重宇宙以及时间箭头方向性的问题；高能热等离子体振荡涉及天体等离子体与电磁波的相互作用机制问题；高能重引力子效应则涉及超越广义相对论的引力波的额外极化态问题，等等。另外，

作为未来可能显示引力量子化的实验效应，显然应该关注于高频和极高频的引力波，这非常类似于显示电磁场量子化的客体（即光子）的实验效应。一旦这些方面的研究（特别是实验观测）有实质性的突破，它将为对各种宇宙学模型和高能天体物理过程的鉴别和判断提供关键性的证据。

由于引力是唯一可以进入到高维空间的基本相互作用，加之引力波具有比电磁波甚至中微子更强的穿透能力。因此，对引力波的观测，不仅能使人们“看”到黑洞碰撞等剧烈天体物理事件所造成的时空曲率的涟漪，它还可能使人们“听”到宇宙大爆炸的回声，甚至可能是回首“前进”宇宙以及捕获来自其他平行宇宙的唯一可能的信息通道和窗口。这将可使人类对于自然界和宇宙的认识再一次发生深刻的变化和飞跃。