

# 多波段引力波宇宙研究和空间太极计划

刘志国 朴云松 乔从丰

(中国科学院大学 100049)

## 1. 引言

2016年2月11日激光干涉引力波天文台(LIGO)实验组宣布直接观测到由两颗恒星级黑洞在十亿年前并合后产生的引力波;时隔仅仅四个月,在6月16日LIGO宣布再一次观测到双黑洞合并产生的引力波信号。这两次实验结果不仅是对100年前爱因斯坦广义相对论所预言的引力波的直接验证,更为人类进一步探索宇宙的起源、形成和演化提供了一个全新的观测手段,也为深入研究超越爱因斯坦广义相对论的量子引力理论提供了实验基础。通过探测各个频段的引力波,包括宇宙大爆炸时期产生的原初的引力波,将开启引力波天文学、引力波物理以及量子宇宙物理研究的新纪元。

普遍认为,广义相对论只是一个关于引力的经典理论,它本身还有不完善的地方。首先,迄今为止还没有一个广义相对论框架下自洽的量子引力场论,人们尝试了各种方案,但最终发现都有问题。其次,因为爱因斯坦拓展狭义相对论建立的以弯曲时空动力学为基础的广义相对论不再具有四维时空平移不变性,不能像狭义相对论中那样很好地定义和度量时间间隔和空间间隔以及能量、动量和角动量等物理守恒量。此外,广义相对论作为弯曲时空动力学无法与其他三种基本相互作用力;电磁力、弱作用力、强作用力在量子场论框架下进行统一描述,因而也无法很好地描述和理解早期宇宙的起源。

暗物质和暗能量的存在都是通过引力效应被观测和发现的。对暗物质属性和暗能量本质的理解离不开对引力本质的认识。因此,引力波的精确测量和对引力本质的深入研究将是21世纪基础科学最前沿和重

大的研究课题,必将引发21世纪基础科学的又一次革命性突破,导致对量子引力、时空结构、物质起源和宇宙起源等基本问题的重新认识。

太空中引力波来自宇宙天体的质量或能量变化,不同频率的引力波对应于宇宙演化的不同时期和不同的天体物理过程。为此,通过不同波段引力波的探测,可使人类进一步了解和认识宇宙的起源、形成和演化。基于目前的探测能力和探测手段,通常把引力波的探测波段分为超低频段、低频段、中低频段、高频段,它们分别对应于小于亿分之一赫兹、百万分之一到亿分之一赫兹、十万分之一到一赫兹、几十到几千赫兹。对应四个频段的引力波,需采用四种不同的探测手段。由于它们探测的引力波波源不同,相应的科学目标也不尽不同。

我国科研人员在所有频段引力波的探测方面都开展了相关研究工作,并参与到了国际合作中。

## 2. 引力波相关的科学研究

在广义相对论中,时空几何并不仅仅是物体运动的背景,它有着自身的动力学内涵,描述引力源所产生的引力场。在动态的时空动力学演化中,时空结构的改变会产生相应的几何曲率振荡行为,这种曲率振荡用波动的形式以光速在时空中转播,即我们所理解的引力波。不同于相对论其他著名预言的验证,引力波的探测不仅仅是对广义相对论正确性的检验,同时也是对广义相对论的基本物理思想“动力学时空”的直接实验检验,并为人类提供了一条探索宇宙演化和高能天体物理动力学过程的途径。

引力波提供了有别于电磁波的一个全新的观测宇宙的重要窗口,最近被LIGO实验首次探测到,成为

人类探索和认识未知世界的新的的重要途径和手段。引力波作为一种物质波和能量波，它与所有物质和能量相互作用，携带着宇宙起源、演化、形成和宇宙结构的原初信息，使得人类可通过引力波探测到基于电磁波天文望远镜所观测不到的宇观尺度和天体源，如：宇宙的黑暗时期、暗宇宙和黑洞等。不同频段的引力波将反映宇宙的不同时期和不同的天体源。

由于引力相互作用本身极其微弱，引力波经过时所引起的时空几何相对改变极其微小，引力波的探测对人类精密测量的能力提出了严峻挑战。1974年，Hulse和Taylor发现了脉冲双星PSR B1913+16，观测到该脉冲双星的轨道周期变短的观测值非常接近于广义相对论预言的引力辐射引起双星轨道变小的理论值，第一次间接证实了广义相对论引力波的预言。2016年2月11日，经过三十多年的不懈努力和技术及装置上的一次次更新，美国地面大型激光干涉引力波探测器LIGO项目科学合作组织(LSC)宣布在第二代地面干涉仪ALIGO开机运行后不久(2015年9月14日)，人类便第一次探测到了引力波信号。LIGO直接捕捉到的引力波信号，来自于远离地球410Mpc之处的双黑洞并合过程。在这个并合过程中，一个36个太阳质量的黑洞与一个29个太阳质量的黑洞并合，经过激烈的引力辐射后，稳定成为一个62个太阳质量的黑洞。这是人类第一次直接探测到引力波，也是第一次看到双黑洞的并合过程。在这个探测中用到了匹配滤波方法，精确求解爱因斯坦引力场方程的数值相对性发挥了极其重要的作用。

正如牛顿运动定律和万有引力理论存在局限性无法描述物质接近光速时的运动规律以及物质之间是如何发生引力相互作用的一样，我们需要推广和超越爱因斯坦理论，更好地定义能量、动量、角动量等守恒量以及时间和空间间隔等物理度量，理解引力子的基本性质，而引力波探测为发展超越爱因斯坦广义相对论的新理论提供了实验基础。

引力波探测天体物理过程是继电磁辐射和粒子辐射之后的一种新途径，可揭示宇宙结构和演化过程的许多新奥秘。正如1888年德国科学家赫兹观测到麦克斯韦电磁理论所预言的电磁波，随后又发现了X光

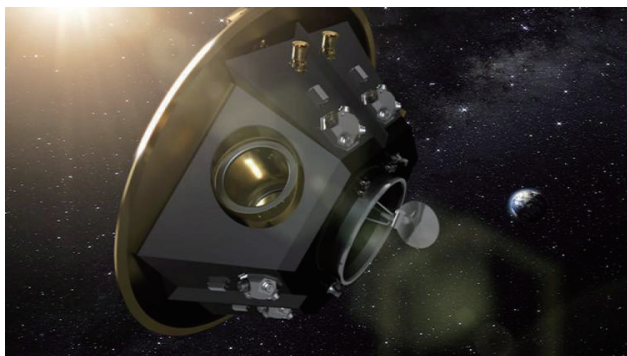
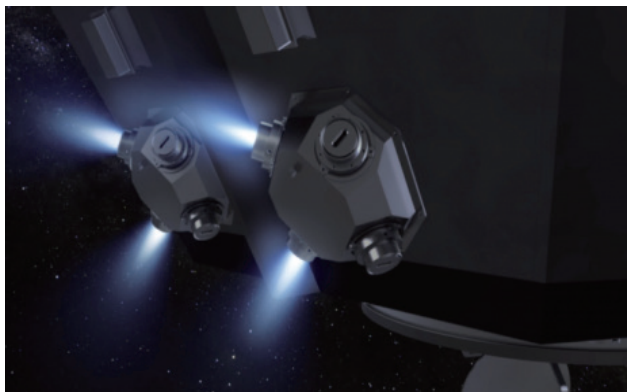
和 $\gamma$ 光子以及放射性粒子。从此，电磁波各个波段，包括微波、红外光、紫外光直到X光和 $\gamma$ 光子都得到了广泛的应用。同时，对电磁相互作用的深入研究使得科学家在20世纪初创立了相对论和量子力学，并在四十年代末发展为量子电动力学，成为描述电磁相互作用的量子理论，导致了半导体、激光、核能、信息等在20世纪的迅猛发展，今天无线电通信甚至量子通讯的发展仍然离不开量子电磁理论的建立和电磁波的发现。

LIGO对引力波的首次直接探测预示着人类已经可以通过探测引力波来研究致密星及其相联系的高能天体物理过程。引力波探测的科学内容已从对广义相对论验证变成通过引力波探测来认识天体物理现象，为人类认识宇宙结构演化、研究相对论天体物理中黑洞和其他致密天体的动力学过程和演化提供一条不可取代的途径。天体来源的引力波按照其质量等特征量的改变具有非常宽广的频段，从小于微赫兹至千赫兹跨越约10个量级。空间与地面激光干涉引力波探测项目的主要区别在于测量频段和目标波源的不同。地面引力波探测由于受到地表振动、重力梯度等噪声以及地面试验尺度的限制，探测频段被限期在10Hz以上，引力波源主要包括几十至几百太阳质量黑洞的并合系统、双中子星并合系统等等，由于波源的特征质量相对较小，可探测的范围被局限在红移小于2的范围内。从天文学考虑，引力波探测需要更高红移的探测范围和面对更大特征质量和尺度的波源。对质量在百万太阳质量的超大黑洞波源而言，探测频段在中低频段(0.1mHz~1Hz)，对这频段的引力波探测需要避开地表振动、重力梯度以及地面试验尺度的限制，在空间实现精密激光干涉测量。地面引力波探测与空间引力波探测两者互补才能得以实现更加宽广波段的引力波探测与引力波天文学。

国际上地基引力波探测，除了正在运行的臂长为4千米的两个激光干涉引力波天文台(aLIGO)和600米臂长的激光干涉引力波天文台(GEO, 德、英合作, 位于德国汉诺威)外，还有正在升级的地面激光干涉引力波天文台主要有位于意大利比萨附近的臂长为3千米的激光干涉引力波天文台(VIRGO, 意、法合作)。

升级后的 VIRGO 计划于 2016 年底开始运行。此外日本东京国家天文台的臂长为 300 米的激光干涉引力波天文台 (TAMA300) 正全面升级为臂长为 3 千米位于地下的激光干涉引力波天文台 (KAGRA), 计划于 2018 年运行。最近, 印度宣布启动地面激光干涉引力波天文台, 将作为 aLIGO 引力波探测地面观测网的组成部分 (LIGO-India)。澳大利亚也正在筹建下一代地面激光干涉引力波天文台。

2015 年 12 月 3 日, ESA 已成功发射了 LISA 的关键技术验证卫星 LISA-Pathfinder。LISA Pathfinder 的主要目的是检验 eLISA 的关键技术, 其目标是在引力波频段  $f=1 \sim 30\text{mHz}$  验证单个检验质量的加速度噪声小于  $3 \times 10^{-14} [1+(f/3\text{mHz})^2] \text{ m/s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ ; 激光干涉仪的分辨率为  $9.1 \times 10^{-12} [1+(f/3\text{mHz})^2] \text{ m/Hz}^{1/2}$ ; 检验微推力器和无拖曳控制技术; 检测推力器、激光器和光学元器件等在空间环境中的寿命和可靠性。目前 LISA Pathfinder 检验效果较为满意。可以说, 经过二十多年的研究, eLISA 计划成为国际上发展较成熟的空间引力波探测计划。目前, eLISA 计划已被欧洲空间局 ESA 确立为 L3 项目, 预期在 2034 年左右发射, 将展开引力波空间探测。



另外, 美国提出的后“爱因斯坦计划”包括两颗星, 其中一颗是“大爆炸观测者”, 着重于探测地面和 LISA 之间的中频 ( $0.01\text{Hz} \sim 100 \text{Hz}$ ) 引力波。日本也提出了在相似频段观测引力波的 DECIGO 计划。这些中频波段的引力波源主要是中等质量的致密双星 (黑洞、中子星、白矮星), 以及宇宙大爆炸早期 ( $10^{-34}$  秒以后) 产生的引力波。但目前这两个计划并没有正式实施。

在我国, 空间引力波探测已被列入中国科学院制定的空间 2050 年规划中。2008 年, 由中国科学院倡议, 挂靠力学所微重力国家重点实验室, 科学院多个研究所及若干院外高校科研单位共同参与, 成立了科学院空间引力波探测论证组, 开始探讨我国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图。经过科学院空间引力波探测论证组的推动与努力, 两期科学院先导科技专项空间科学预先研究项目相关课题的研究工作对我国空间激光干涉引力波探测任务已经给出了较明确的概念规划, 明确了未来数十年内学科的发展路线图, 目前第三期先导专项课题研究也正在执行, 深入开展对任务相关科学内容的研究。预研初步设计我国引力波空间探测任务沿用空间激光干涉引力波探测最自然的三角形形结构, 卫星阵列由 3 颗在地球绕日轨道上运动的卫星组成, 应用差分激光干涉技术, 测量相邻航天器内做测地运行的自由悬浮检验质量之间的实时距离变化, 对中低频波段 ( $0.1\text{mHz} \sim 1\text{Hz}$ ) 的引力波进行直接探测。

### 3. 空间引力波探测与太极计划

中国科学院引力波“空间太极计划”的初步规划是以中欧合作的模式发射二组卫星作为引力波探测激光干涉空间天线阵, 在科学目标各自有所侧重的同时, 进行相互验证。太极计划方案规划在 2033 年左右发射三颗卫星组成的等边三角形引力波探测星组, 在地球绕日轨道发射入轨后位于偏离地球太阳方向约  $18 \sim 20$  度的位置进行绕日运行 (离地球距离约 5000 万公里), 这样可避开地球重力梯度噪声的影响。三颗卫星组的质心位于地球绕日轨道, 所构成的平面与黄道面之间约成  $60$  度夹角, 使得卫星始终面对太阳保持热辐射的稳定性, 有利于满足探测器温度变化控制

在百万分之一的要求。为保证太极计划在 2033 年左右发射具有可行性，在方案设计中采用较保守的参数选择作为太极计划的初步设计指标。在航行器之间臂长为  $3 \times 10^9$  米的情况下，需保证轨道游离小于  $3 \times 10^4$  米，两臂夹角改变量小于 1 度。

经过两期科学院先导科技专项空间科学预研课题的开展，通过权衡技术的可行性与科学的前瞻性，太极计划选择以高红移开始的中至大质量双黑洞并合系统为主要科学目标。由于频段的选择和位移（光学平台）的噪声比 LISA 更有效的压制，相比 LISA，在中高频段太极对高红移中质量黑洞并合有更优越的探测能力，科学目标有以下先进性：

(1) 通过探测高红移黑洞并合，在天文学领域太极开拓第一代恒星塌缩而成的种子黑洞的探索。按照目前对宇宙结构和形成的理解，这些种子黑洞是今天在星系中心观察到的超大质量黑洞的种子，对宇宙的第一束光以后，星系结构形成和演化起到至关重要的作用。

(2) 第一次在红移介于 14~20 区间，探测质量在 3000 到 500 太阳质量左右的双黑洞。LISA 并不具备这样的探测能力。预期在未来二十年左右，技术的进步有可能把质量降到几百太阳质量和红移进一步提高。

太极计划相对于 eLISA 另一个显著的优势是将按六路激光干涉设计，六路激光链路最重要的好处是工程可靠性。六路构成三个半独立的迈克尔逊 (Michelson) 干涉仪。其中一个链路出了问题，任务还能继续，在工程上提供了可靠性；三个半独立干涉仪能进行多个差分测量，更有效压制噪声，特别是激光频率噪声；六路还构成 Sagnac 干涉链路。由于在低频迈克尔逊和 Sagnac 对随机背景引力波相应频率的依赖关系不一样，可以利用两个不同的干涉链路把仪器噪声和背景引力波背景剥离，提高背景引力波上限的探测能力。

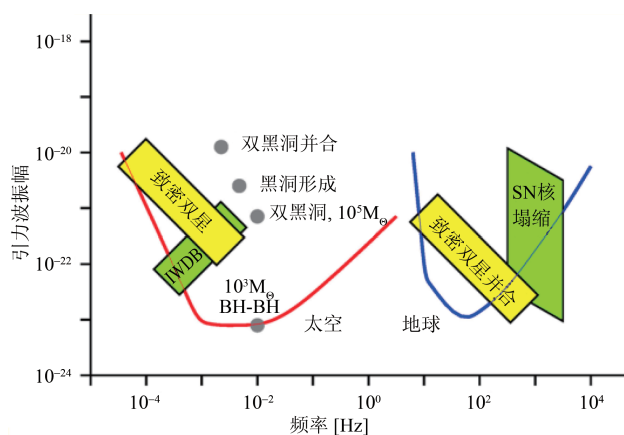
十三五为太极计划预研阶段，将进行总体规划 and 方案优化、科学目标和理论分析、太极计划独立发射卫星组的关键技术以及时变地球重力卫星的飞行模拟。按照太极计划三步走的战略，十四五期间将发射太极计划探路者 (pathfinder) 双星，对太极计划关键技术进行太空验证。由于技术类似，太极探路者也将同时作为精度高于 GRACE 重力卫星一到两个数量级

的下一代时变地球重力卫星，开展高精度重力测量、地球质量分布与迁移规律，以及全球气候环境变化的检测与研究等应用科学问题研究。

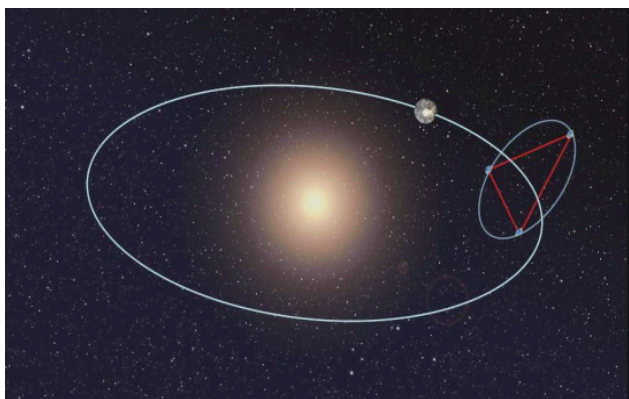
与地面引力波探测相比，空间引力波探测任务所面对的波源普遍来说特征质量和尺度都大很多，探测器具有更宽广的视野，拥有大量甚至多至发生信号混淆的波源，主要包括星系并合引起的从中等质量黑洞至大质量黑洞的双黑洞并合系统、星系（星团）中心附近恒星质量黑洞等致密小天体和超大质量（中质量）黑洞形成的超大质量比（中等质量比）双黑洞绕转系统、大量河内河外致密双星系统以及早期宇宙和量子引力来源等等。

空间与地面激光干涉引力波探测器在测量原理上基本相同，但不同于地面试验固定终端镜面之间的干涉，空间引力波探测要在空间自由漂浮的测试质量之间实现激光干涉测量，因此所涉及的关键技术与地面引力波探测有很大不同，一是保证测试质量的无拖曳运动，二是实现空间长基线（例如百万千米量级）的弱光干涉技术完成弱力测量。原理虽然与地面探测原理一样简单，但所需的探测技术涉及面更广泛，如激光干涉部分的空间长时间（数年寿命）稳定工作的激光、空间望远镜、高精度激光测距系统、保证卫星跟随做测地运动检验质量的超高精度无拖曳控制与亚微牛级分辨率推进等诸多关键技术，保证运行稳定性和热稳定性的轨道设计，以及超静超稳卫星平台和卫星载荷的一体化总体设计等大量高新精密技术以及理论分析与大数据处理。

早在 1993 年，欧洲空间局 (ESA) 首先提出



空间与地面引力波探测频带



LISA 计划航天器绕太阳轨道

激光干涉空间天线 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划, 在  $10^{-4} \sim 10^{-2}$  Hz 波段进行空间引力波测量。1997 年美国空间局 (NASA) 加入, 成为欧、美联合计划。LISA 的科学目标是探测低频引力波, 探测频率为  $10^{-4}$  Hz  $\sim$  1 Hz。LISA 主要由三颗相距 500 万公里的航天器组成, 构成一个等边三角形, 航天器的轨道为行星轨道, 与地球一起绕着太阳运动, 落后地球  $20^\circ$ , 对自由漂浮在航天器内沿测地线进行自由落体运动的检验质量之间进行极端精确的测距, 而检验质量之间间距变化就直接反映了引力波的时空传播效应。根据引力波源和强度分析, 当频率在 10 mHz 时, 给出引力波探测应变需达到  $10^{-23}$ , 这要求 500 万公里测量基线上的激光测距噪声控制在  $40 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$  以内。激光位移测量是 LISA 的科学数据, 激光测量系统包括激光光源及频率稳定和光强稳定的控制、望远镜和指向控制系统、光学测量平台、高精度相位计、弱光锁相系统和高稳定时钟以及悬浮的检验质量。要达到 LISA 预期的指标, 激光光强需达到 2 W, 对应航天器接受到光强约为  $10^{-10}$  W, 散粒噪声限制约为  $10 \text{ pm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。在引力波频段 1 mHz, 光源频率稳定需达到  $30 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ , 光强的稳定度达到  $2 \times 10^{-4}/\text{Hz}^{1/2}$ 。光学测量平台的温度变化需控制在  $10^{-6} \text{ K}/\text{Hz}^{1/2}$ , 需选择超低热膨胀系数材料使其膨胀系数达到  $10^{-8}/\text{K}$ 。望远镜口径需达 30 cm, 其指向平均值偏差与指向控制稳定度乘积需控制在  $0.1 \text{ nrad}/\text{Hz}^{1/2}$ 。在引力波频段 0.1 mHz, 每个检验质量的残余扰动加速度需控制在  $3 \times 10^{-15} \text{ m}/\text{s}^2/\text{Hz}^{1/2}$ , 这要求航天器必须进行无拖曳轨控 / 姿控 (简称无拖曳控制), 维持检验质量与航天器在敏感

方向的相对位移变化接近皮米量级 (小于  $2.5 \times 10^{-9} \text{ m}/\text{Hz}^{1/2}$ ), 姿态控制达到  $1.5 \times 10^{-7} \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2}$ , 检验质量与航天器之间的相对位移测量分辨率需达到  $1 \text{ nm}/\text{Hz}^{1/2}$ 。要求检验质量电荷控制在  $10^{-13} \text{ C}$ 。航天器的温度也需严格控制, 否则由于温度形变引起航天器对检验质量的引力变化会淹没待测的引力波信号。另外, 要求掌握检验质量的锁紧与释放技术, 因检验质量与电容极板存在较大间距 (4 mm), 需保证在发射期间锁紧检验质量, 入轨正常后释放检验质量。显然, 要达到这些技术指标, 需研发一系列高精度高稳定性的精密测量仪器和装置, 并配合有效误差分析与补偿技术以及信号处理程序。如微推力器的研制、航天器轨道调整与跟踪控制、航天器整体的热设计与控制、航天器轨道设计与运载等。同时, 引力波源的深入论证、信号提取与数据分析的研究将直接关系到具体航天器和载荷的设计。

毫无疑问, 以上所涉及的一系列研发成果将把高新精密技术以及理论分析与大数据处理等推向一个全新的水平。考虑到 LISA 计划涉及平台和载荷技术难度大, ESA 和 NASA 启动了 LISA 技术验证计划, 并经过预研双方确定了单颗卫星验证计划, 称之为 LISA 探路者卫星验证计划 (LISA-Pathfinder)。2011 年由于 NASA 的退出, 欧洲的预算缩减, LISA 发展成为现在的 eLISA (evolved LISA, 演化激光干涉空间天线) / NGO (New Gravitational wave Observatory) 项目。eLISA 将由三个相同的探测器构成, 但探测器之间的臂长由原计划的 500 万公里演化为 100 万公里的等边三角形, 同样使用激光干涉法但由原来的六路激光干涉减少为两路激光干涉。不同于六路激光干涉相当于三个独立的干涉实验可进行相互检验, 两路激光干涉将缺乏相互验证。

中科院的“空间太极计划”主要采用空间激光干涉法测量中、低频段引力波 (0.1 mHz~1.0 Hz)。此频段除了覆盖欧洲空间局的 eLISA 项目探测频段, 其波源包括超大质量和中等质量黑洞的并合、极大质量比绕转系统、河内白矮星绕转、以及其他的宇宙引力波辐射过程, 太极计划方案侧重于在 0.01 Hz~1.0 Hz 频段具有比 LISA/eLISA 更高的探测灵敏度, 有别于 LISA/

eLISA 的科学目标，将重点瞄准总质量在几百至十万太阳质量范围内的中等质量双黑洞绕转并合系统，使得太极计划具有明显优越的探测能力。太极计划的主要科学目标是通过引力波的精确测量，测定黑洞的质量、自旋以及分布和极化，探索中等质量种子黑洞是如何形成的，暗物质能否形成种子黑洞，种子黑洞是如何成长为大质量黑洞和超大质量黑洞，寻找第一代恒星形成、演化、死亡的遗迹，对原初引力波强度给出直接限制，为揭示引力本质提供直接的观测数据。

#### 4. 总结

科学技术发展到今天，人类已经有能力通过探测引力波研究引力这个人类感知最早、科学上却知之甚少的自然界最基本的一种相互作用。中华民族曾经有

过灿烂的文明和辉煌的历史，民族复兴、实现中国梦是时代的号召也是每个中国人的想往。当前中国有能力也应该为人类文明做出更大的贡献。引力波探测相关的科学和技术就是一个可选择的重要突破方向。

科学的发展有其内在的需求和驱动，但也不应完全脱离现实。引力波空间探测计划涉及学科领域广泛，包括：物理学、天文学、宇宙学、空间科学、光学、精密测量、航天技术、导航与制导、飞行器与轨道设计等。随着引力波空间探测计划的实施所发展的一系列高端空间技术，在惯性导航、地球科学、高精度卫星平台等方面都具有重要应用价值，必将造福国家，惠及民生。

本文受中国科学院战略先导科技专项 (B): 多波段引力波宇宙研究 — 太极计划预研项目资助

#### 科苑快讯

### 普通咖啡机也能用于复杂化学分析

化学分析经常需要大量时间和贵重设备，更不要说那些刺激性的溶剂了。但是现在咖啡机就可以轻松完成这些分析。研究者利用现成的台式咖啡机，快速而廉价地从污染土壤样本中提取称为多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的致癌污染物。首先，他们将装有 5 克多环芳烃污染土壤的胶囊放入咖啡机。然后不是用水，而是将 50 毫升的水和乙腈溶剂 (图中瓶内液体) 的混合物在正常温度和压力下灌入土壤样本，这一过程用了 11 秒，而一些其他方法则需要 30 分钟甚至更长时间。最后，他们将“产物”放入其他实验室设备以正常流程检测土壤中提取的成分。

使用咖啡机测量的土壤多环芳烃浓度与其他标准方法相比通常要低 20% 以内，研究者在《分析化学》(Analytical Chemistry) 期刊上做了报告。研究组认为，尽管胶皮管、密封圈和其他内部连接都被替换了，用现成的咖啡机进行分析却是一个低成本的选择。目前，

研究组正在测试咖啡机是否还可用于检测食品或土壤样本中的杀虫剂、药物和清洁剂。



(高凌云编译自 2016 年 6 月 15 日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))