

引力波探测和引力本质研究

——21 世纪基础科学的革命性突破

一、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多亿年前并合后产生的引力波。这一实验结果不仅是对 100 年前爱因斯坦创立广义相对论所预言的引力波的一次直接验证,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的引力波,必将开启引力波天文学和引力波物理以及量子宇宙物理研究的新领域。

然而,广义相对论不可能是一个完整的理论。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。广义相对论作为弯曲时空动力学无法与其它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。因此,广义相对论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,导致人们对量子引力、时空结构、物质起源和宇宙起源等基本问题的重新认识。

二、引力波发现实现人类等待百年的大梦想

引力波终于被人类首次直接观测到,既是科学家们预料之中的一个重要历史时刻,也是科学史上又一次具有里程碑意义的发现。尽管广义相对论通过解释水星近日点进动和预言光线在引力场中的偏折和光谱的红移得到了实验的多次验证,包括引力波的间接验证,即 1974 年泰勒 (Joseph Hooton Taylor) 和赫尔斯 (Russell Alan Hulse) 发现脉冲双星 PSR B1913+16,并经仔细观测获得的该双星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的双星轨道变小的理论值,并于 1993 年获得诺贝尔物理学奖。然而,只有直接探测到引力波的存在才是对广义相对论的根本性验证。

引力存在于宇宙所有物质和能量之间，是人类最早认识的一种基本作用力。正是引力作用支配着宇宙的形成和演化。然而，相比其它三种基本相互作用力，电磁力、强作用力和弱作用力，人们对引力本质的认识最不清楚。从 1687 年牛顿发现万有引力定律到 1915 年爱因斯坦建立广义相对论，使得人类对引力的认识产生了革命性的飞跃，引力与时空紧密相联。1916 年爱因斯坦预言了引力波的存在，与电磁波一样，它可离开引力场源而独立在真空中传播。1918 年爱因斯坦进一步证明，引力波是以光速传播的具有两种偏振模式的横波。上世纪五十年代理查德·费曼（R. Feynman）和赫尔曼·邦迪（H. Bondi）证明了引力波的存在与坐标选择无关，表明引力波是可以测量的物质波。在笔者最近建立的引力量子场论中，进一步表明自然界基本规律与坐标和标度选择无关并遵循局域规范对称性，基本引力场作为双标架四维时空中的双协变矢量规范场，与所有量子场相互作用。

引力波在宇宙中无处不在，但由于引力波强度极其微弱，只有不到电磁相互作用的亿亿亿亿分之一，很难想象引力波能被探测到。不仅爱因斯坦认为引力效应很小，几乎不会对任何事物造成影响，也没有人能够测量它。因此，探测引力波似乎是一种梦想，这次引力波的发现实现了人类等待百年的大梦想。

然而，引力波的发现过程并不是一帆风顺的。自上世纪六十年代起，科学家们就开启了探测引力波的征程。首先由美国马里兰大学的物理学家韦伯（Joseph Weber）提出了用一种共振棒探测器进行引力波探测。探测器制成为圆柱形的多层铝筒，直径一米、长度两米、质量约一吨。当引力波经过圆柱形探测器时将会发生共振，通过安装在圆柱周围的压电传感器进行检测。为了能独立验证可能的引力波信号，韦伯在相距 1000 公里的两个地方安装了相同的探测器，当它们同时检测到相同的信号时才作为引力波信号。当韦伯 1969 年正式宣称探测到了引力波信号时，引起了当时学术界的广泛关注。上世纪七十年代，国际上许多大学和科研院所开始研制和建造引力波探测器，展开引力波探测实验，包括我国的中山大学和中科院高能物理研究所。但所有实验都没有探测到引力波信号，即使比韦伯实验更精密的仪器，也没能对韦伯实验结果给出进一步的实验验证。事实上，在上世纪七十年代中，德国马普研究所的实验小组发现韦伯的实验结果是错误的。

与此同时，在美国麻省理工学院的物理学家韦斯（Rainer Weiss）开始构想基于迈克尔逊干涉仪原理的激光干涉方法开展引力波探测。韦斯研究组进行了原理样机的研制，德国研究组还成功研制了 30 米原型探测器。到上世纪七十年代后期，麻省理工学院研究小组开始研究一项新方案，建设一个大型的、数公里规模的激光干涉引力波探测器。到八十年代中，美国国家科学基金会（NSF）建议由麻省理工学院和加州理工学院联合实施激光干涉引力波探测计划，并成立了由理论物理学家和实验物理学家：索恩（Kip Thorne）、德雷弗（Ronald Drever）、韦斯（Rainer Weiss）组成的指导委员会。他们提出了一个较完整的实验方案，

即建造臂长达4公里的两个激光干涉引力波天文台（LIGO），成为了LIGO实验的联合创始人。

另一方面，自1974年起，泰勒和赫尔斯对脉冲星双星系统（PSR1913+16）的轨道进行长时间的观测，他们所观测到的数据与广义相对论的理论计算值在误差范围内一致。因依据广义相对论，该双星系统将以引力波的形式损失能量，使得轨道周期缩短和半长轴减少。由此，泰勒和赫尔斯给出了引力波存在的第一个间接证据，并于1993年荣获诺贝尔物理学奖。

直到上世纪九十年代初，在美国国家科学基金会的资助下，由加州理工和麻省理工联合主导的LIGO实验正式开始建造。每个探测器由两个互相垂直的干涉臂构成巨大的L型，臂长均为4公里。从激光光源发出的光束在两臂交会处被一分为二，分别进入互相垂直并保持超真空状态的空心圆柱体内，再由放置在终端的镜面反射回到出发点，让两束激光发生干涉。引力波是一种横波，当有引力波通过时，两臂的长度会发生不同的变化。若一臂的长度略微变长，则另一臂的长度就会略微缩短，由此造成两束激光的光程差发生变化，使得激光干涉条纹发生相应的变化（原理见图1）。

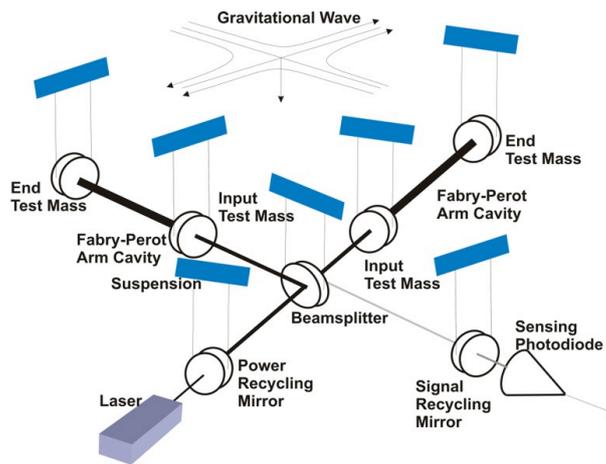


图1 LIGO引力波实验激光干涉简单原理示意图？

Laser-激光， Power Recycling Mirror-功率回收镜， Signal Recycling Mirror-信号回收镜， Beamsplitter-分束器， Input Test Mass-输入端测试质量， End Test Mass-终端测试质量， Suspension-悬架， Fabry-Perot Arm Cavity-法布里佩罗特臂腔， Sensing Photodiode-传感光电二极管

LIGO在上世纪末建成，一个探测器位于华盛顿州汉福德市，另一个探测器坐落于路易斯安那州利文斯顿市。探测器根据设计方案正常运行，并在运行中不断改进提高精度。尽管当时LIGO已是全世界最大的、灵敏度最高的引力波探测天文台，但到2010年，LIGO一直没有探测到可解释为由引力波引起的任何异常。基于LIGO已达到了预期的探测灵敏度，必须重新改装升级成更先进、更灵敏的引力波探测器（Advanced LIGO，简称aLIGO）才有希望探测到微弱的引力波。升级了

诸多新技术的aLIGO于2015年9月正式投入运行。很幸运，在2015年9月14日9:51（世界协调时间，北京时间当天为17:51），aLIGO的两个实验装置同时观察到了被命名为GW150914事件的引力波。实验成果《双黑洞并合系统引力波辐射的观测》发表在美国《物理评论快报》(*Physical Review Letter*)。北京时间2016年2月11日23:40左右，aLIGO负责人加州理工学院教授大卫·瑞兹(David Reitze)宣布人类首次直接探测到了引力波。报道称这次引力波事件是两个质量分别约为29个太阳质量和36个太阳质量的双黑洞并合成质量约为62个太阳质量的黑洞，约3倍太阳质量转化成了引力波能量。双黑洞并合最后时刻所辐射的引力波的峰值强度比整个可观测宇宙的电磁辐射强度高10倍以上。双黑洞并合发生在距离地球大约410兆秒差距，即大约13亿光年（亮度距离），引力波穿过遥远的星系，让人类首次观测到它的频率在0.2秒内从35赫兹增加到150赫兹。

三、引力波探测打开人类探索宇宙的新窗口

引力波发现后，使得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，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。

由于引力相互作用极其微弱，宇宙中具有可观测效应的引力波事件发生在具有巨大引力辐射功率的天体剧烈运动过程，主要包括宇宙早期的暴胀和天体的大质量、大尺度运动和演化。对引力波谱的研究表明，由恒星级致密天体的剧烈运动所产生的高频引力波（几十至几千赫兹），可基于地面的激光干涉引力波天文台进行探测。除了正在运行的臂长为4公里的两个激光干涉引力波天文台（aLIGO，图2）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），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公里的激光干涉引力波天文台（VIRGO，意、法合作，图3），升级后的VIRGO计划于2016年底开始运行。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公里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）。另外，澳大利亚也正在筹建下一代地面激光干涉引力波天文台。



(a)

(b)

图2 (a)美国 LIGO Livingston Observatory. (b) 美国 LIGO Hanford Observatory

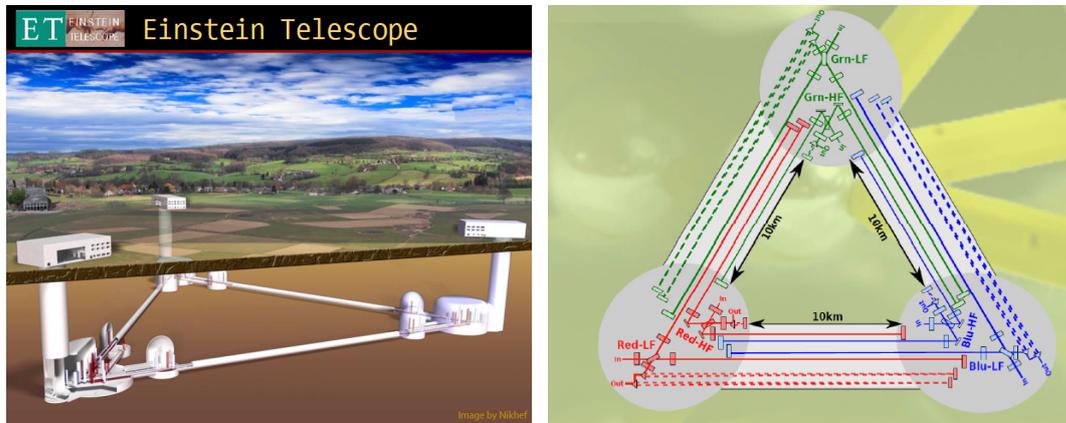


图3 意大利 Virgo Gravitational-wave Detector

地面探测的高频引力波天体源是恒星级致密星双星系统，如双中子星和双黑洞系统，它们主要是由恒星坍缩后形成。高频引力波天体源还可包括快速旋转的致密天体，通过周期性的引力波辐射损失掉角动量，信号强度由非对称程度决定，如非对称中子星等。另外，恒星爆发时的非对称性动力学性质也会产生高频引力波，如超新星或伽马射线暴爆发等。通过探测来自这些天体的引力波，可了解到它们最直接和最深层的信息。为能更精确地探测这些天体的引力波源，进一步了解天体的结构，需研制更高灵敏度的下一代地面激光干涉引力波天文台。

2015年4月至5月期间，在中科院卡弗里理论物理研究所（KITPC/ITP-CAS）举办了为期一个月的大型国际引力波科研项目活动“The Next Detectors for Gravitational Wave Astronomy”。为纪念爱因斯坦广义相对论发表一百周年，在KITPC引力波科研项目的最后一周，由中国科学院大学和中科院理论物理研究所联合举办了“引力与宇宙学国际会议暨第四届伽利略-徐光启会议”，来自世界各地活跃在前沿的约200名科学家参加了此次国际会议。KITPC引力波科研项目活动对引力波探测起到了推动作用，汇聚了全世界引力波研究的主要专家学者，探讨未来引力波探测及引力波天文学的发展趋势。来自世界主要大型引力波探测实验项目和12个国家的专家学者，包括美国LIGO项目的两任执行主任，都参加了KITPC引力波科研项目的学术研讨活动。现任aLIGO项目执行主任、也是此次引力波新闻发布会主讲人、加州理工学院教授David Reitze参加了KITPC引力波科研项目学术活动，并作了题为“Advanced LIGO and the Dawn of Gravitational Astronomy”的开场报告和题为“The Next Detectors for Gravitational Astronomy”的主题学术报告。与会专家学者深入研讨和总结了LIGO地面探测器关注的高频引力波在内的多波段引力波源、探测手段和方法、数据处理等引力波天文学的进展。同时，探讨了下一代引力波探测器设计和构建中的挑战与相关技

术，以及引力波在未来天文学、宇宙学等领域的应用，包括臂长为10公里的正三角形六路激光干涉的下一代地面引力波探测器：爱因斯坦望远镜（图4）。



(a) 爱因斯坦望远镜 (b) 地面三角形激光干涉探测器六组激光干涉

图4 下一代地面引力波探测实验装置示意图

然而，基于地面的引力波探测实验装置，由于受空间距离的限制和地球重力梯度噪声的影响，无法探测低于10赫兹的引力波，使其研究目标变得较为有限。研究表明，天体来源的引力波按照随质量相关特征量的改变具有非常宽的频段，从小于十个微赫兹至几千赫兹跨越达8个量级（图5）。为避免地面上容易受到干扰和受制于空间距离尺度等因素，多国科学家展开了空间引力波探测的研究计划。探讨采用空间激光干涉法测量中、低频（0.01毫赫兹-10赫兹）引力波。空间与地面激光干涉引力波探测器的主要区别在于测量频段的选取和面向不同的波源，两者互补可实现更宽频段的引力波探测。但由于地面激光干涉引力波探测的高频段引力波波源主要来自小黑洞并合等，事件发生率低、并合过程短暂、波源位置不易确定。空间引力波探测器对中低频段较敏感，面对的波源特征所对应的天体质量和尺度远大于地基引力波探测器所对应的天体源，视野也更深广。

目前，国际上主要几个空间激光干涉引力波探测任务，其设计所覆盖的是引力波波源最为丰富的频段（0.01毫赫兹-10赫兹）（图5），拥有大量甚至是可以保证探测到的天体波源，主要包括星系并合引起的从超大质量到中等质量双黑洞的并合系统，星系（星团）中心附近恒星质量黑洞和超大质量（中等质量）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来源于早期宇宙的残留引力波等，可进行长时间观测，有利于确定波源的位置。

空间引力波探测需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实验有所不同，一是保证测试质量的无拖曳运动，二是实现空间长基线（通常百万公里量级）的弱光锁相干涉测量。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，如远距离超高精度激光干涉系统、大功率小型化超稳星载激光器、超高灵敏度惯性传感器、超高精度卫星无拖曳控制、亚微牛级分辨率推进器、超静超稳卫星平台、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。

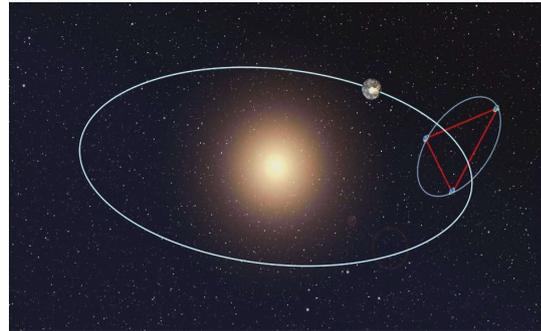
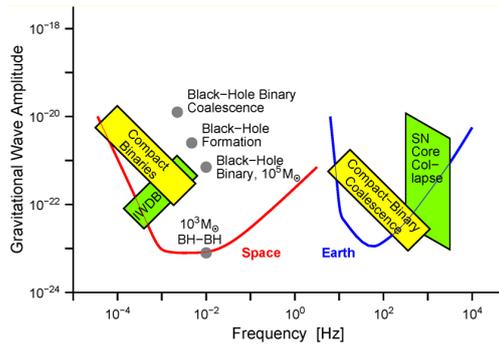


图5 空间与地面引力波探测频带

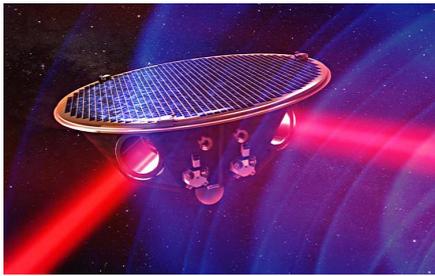
图6 LISA计划航天器绕太阳轨道运行示意图

Space-空间, Earth-地面, Frequency-频率, Gravitational Wave Amplitude-引力波振幅, Black-hole Binary Coalescence-双黑洞并合, Black-Hole Formation-黑洞形成, Black-Hole Binary-双黑洞, Compact Binaries-致密双星, SN Core Collapse-超新星核塌缩, Compact-Binary Coalescence-致密双星并合,

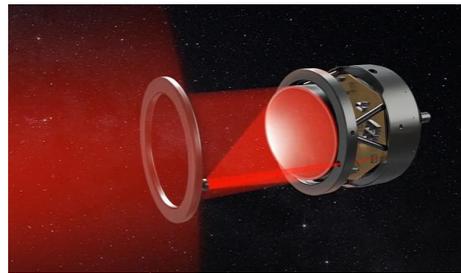
早在1993年, 欧洲空间局 (ESA) 首先提出激光干涉空间天线LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 计划, 在 10^{-4} - 10^{-2} 赫兹波段进行空间引力波测量。1997年美国空间局(NASA)加入, 成为欧、美联合计划。LISA的科学目标是探测低频引力波, 探测频率为 10^{-4} -1赫兹。LISA主要由三颗相距5百万公里的航天器组成, 构成一个等边三角形, 航天器的轨道为行星轨道, 与地球一起绕着太阳运动 (图6), 落后地球 20° , 对自由漂浮在航天器内沿测地线进行自由落体运动的检验质量之间进行极端精确的测距, 而检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毫赫兹时, 给出引力波探测应变需达到 10^{-23} , 这要求五百万公里测量基线上的激光测距噪声控制在40皮米/赫兹 $^{1/2}$ 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1瓦, 对应航天器接受到光强约为 10^{-10} 瓦, 散粒噪声限制约为10皮米/赫兹 $^{1/2}$ 。在引力波频段1毫赫兹, 光源频率稳定需达到30赫兹/赫兹 $^{1/2}$, 光强的稳定度达到 2×10^{-4} /赫兹 $^{1/2}$ 。光学测量平台的温度变化需控制在 10^{-6} 开氏温度/赫兹 $^{1/2}$, 需选择超低热膨胀系数材料使其膨胀系数达到 10^{-8} /开氏温度。望远镜口径需达30厘米, 其指向平均值偏差与指向控制稳定度乘积需控制在 140×10^{-18} 弧度 2 /赫兹 $^{1/2}$ 。在引力波频段0.1毫赫兹, 每个检验质量的残余扰动加速度需控制在 3×10^{-15} 米/秒 2 /赫兹 $^{1/2}$, 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 2.5×10^{-9} 米/赫兹 $^{1/2}$), 姿态控制达到 1.5×10^{-7} 弧度/赫兹 $^{1/2}$, 检验质量与航天器之间的相对位移测量分辨率需达到1纳米/赫兹 $^{1/2}$ 。要求检验质量电荷控制在 10^{-13} 库仑。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毫米),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(图7,图8),并配合有效误差分析与补偿技术以及信号处理程序。

如微推进器的研制、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。



(a) 空间两臂激光干涉示意图



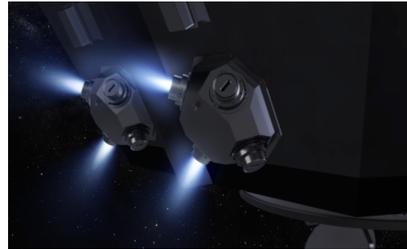
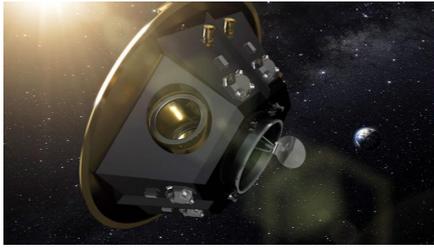
(b) 航天器关键技术载荷示意图

(Credit: AEI/MM/exozet/NASA/Henze)

(Credit: AEI/MM/exozet)

图7 引力波空间探测相关关键技术示意图

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200万公里的等边三角形,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。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 $f=1\sim 30$ 毫赫兹验证单个检验质量的加速度噪声小于 $3 \times 10^{-14}[1+(f/3\text{mHz})^2]$ 米/秒²/赫兹^{1/2};激光干涉仪的分辨率为 $9.1 \times 10^{-12}[1+(f/3\text{mHz})^2]$ 米/赫兹^{1/2};检验微推进器和无拖曳控制技术;检测推进器、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计划已被欧空局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。



(a)Sonnereflex示意图 (Credit: AEI/MM/exozet) (b)微牛推进器示意图 (Credit: AEI/MM/exozet)

图8 引力波空间探测相关关键技术示意图

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(10^{-2} -100 赫兹)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。

四、多波段引力波宇宙研究和空间太极计划

宇宙中的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，使得人类可进一步了解和认识宇宙的起源、形成和演化。从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。目前，对应四个频段的引力波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同。

在白春礼院长主持下，中科院多次召开引力波探测和前沿科学研究会议，贯彻习近平总书记重要批示精神和中央与国务院领导的相关指示，结合中科院已有的科研基础，发挥中科院人才队伍和科研力量的综合优势，积极展开部署，启动中国科学院“多波段引力波宇宙研究”项目，制定近期、中期、远期的发展目标。坚持面向国际科技前沿和面向国家需求的办院方针，在开展引力波探测的同时，利用空间引力波探测发展的精密测量技术进行地球重力场研究，研发下一代时变地球重力卫星(Grace-Follow-On)，提高重力观测的时空分辨率和精度，更好地为全球环境变化，特别是对我国近海区域气候变化与海洋动力学、陆地水与地下水、山岳冰川融化等的研究提供有效的观测手段和更精准的信息。

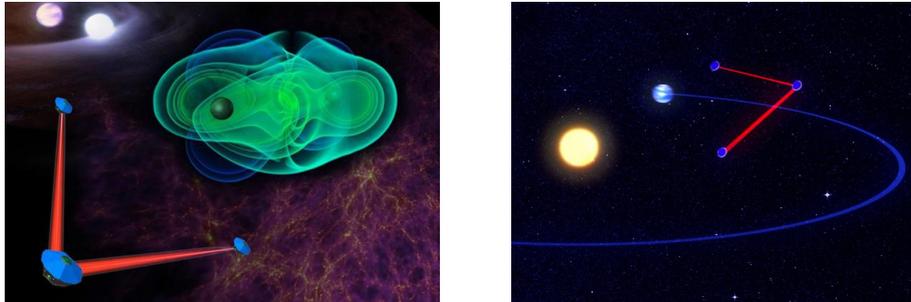
我国科研人员在所有频段引力波的探测方面都开展了相关研究工作，并参与到国际合作中。高频段和中低频段引力波主要通过激光干涉分别在地面和空间进行直接探测，而低频段和超低频段引力波主要利用天文学手段进行间接探测。这次发现的引力波就是aLIGO利用地面激光干涉装置观测到恒星级双黑洞并合产

生的高频引力波信号，我国清华大学团队参与了aLIGO的相关工作。中低频段的引力波主要利用激光干涉空间天线阵进行探测，欧洲空间局的eLISA项目已进行了二十多年的研究，中科院除了积极参与eLISA计划的国际合作，正在自主规划引力波探测空间“太极计划”，该计划将充分利用中科院长期聚集的多学科人才优势、长期积累的前瞻性高端技术与大科学装置的综合平台以及长期倡导的学科交叉和科教融合特色，围绕中低频段引力波开展引力波空间探测研究。低频段引力波主要利用毫秒脉冲星作为校准源通过地面大型射电望远镜高精度时间监视进行探测，中科院基于国际上最大口径射电望远镜FAST以及与20多个国家正在合作建设的平方公里阵列望远镜SKA一期，组成引力波探针阵列进行高精度时间监视来探测引力波引起的地球周围的扰动。超低频段的原初引力波主要通过宇宙微波背景辐射（CMB）的B模式偏振信号进行探测，中科院基于西藏阿里天文台，利用北半球最佳的地理环境和气象条件以及配套设施等优势，通过中美合作模式，建设北半球首台CMB原初引力波探测望远镜。

早在2008年，由中科院发起，院内外多家单位参与，由中科院胡文瑞院士召集成立了空间引力波探测论证组，开始规划我国空间引力波探测在未来数十年内的发展路线图。空间引力波探测已列入中科院空间2050年规划。2010年由胡文瑞院士牵头经中科院提交了国家重大科技基础设施中长期重点建设项目建议“空间引力波观测”。2012年，成立中科院引力波探测工作组。2013年由笔者牵头经中国科学院大学提交了973计划项目申请书“空间引力波探测的地基研究”。目前已形成了一支以中科院科研人员为主的引力波物理空间太极计划（Taiji Program in Space）工作组以及紧密与任务相关的多个研究小组。在中科院先导科技专项空间科学预先研究项目连续三期的资助下，太极计划工作组展开了各种学术交流活动，在引力波源的理论及探测研究和卫星技术研究上取得了诸多进展。

作为大科学工程的基础科学研究离不开国际合作。目前，已有来自科研机构和高校的十多个单位参与到空间太极计划中。自2012年起，空间太极计划工作组每年组织其成员参加欧空局（ESA）的激光干涉空间天线阵（eLISA）项目召开的工作年会，进行广泛交流探讨。另外，空间太极计划工作组已与eLISA项目的主要牵头单位德国马普学会引力物理研究所和爱因斯坦研究所在2013年和2015年分别在中国和德国组织召开了两次双边会议，并形成了双方合作的备忘录。在中德科学中心的支持下，2015年召开了空间引力物理研讨会，50多位专家学者参加了会议，包括德国和欧洲几乎所有相关领域的主要负责人以及美国相关研究机构和NASA的多位代表，一些工业界的代表也参加了此次会议。会议深入探讨了eLISA计划、LISA-Pathfinder、空间太极计划和下一代时变地球重力卫星（GRACE Follow-On）等进展，中国和欧洲的现有技术水平和发展现状，中国参与欧洲项目，联合发展下一代地球重力卫星项目和发展中德联合研究机构或团队。会议高水平的报告使得所有参会者都受益匪浅，也使得来自中国和欧美的与会者代表对未来合作的可能性和局限性都有了更加深入的认识。尤其是经过近几年的努力，

中国参与空间太极计划的成员单位，在部分探测仪器设备的研制水平和技术方面已快速接近和基本达到空间探测项目的要求。



(a) 引力波源探测示意图 (Credit: eLISA Consortium) (b) 卫星太阳轨道示意图

(Credit: AEI/MM/exozet)

图9 引力波空间探测示意图

中科院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毫赫兹-1.0赫兹)。此频段除了覆盖欧空局的 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、以及其它的宇宙引力波辐射过程(图9),太极计划方案侧重于在 0.01-1.0 赫兹频段具有比 LISA/eLISA 更高的探测灵敏度(图10),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。

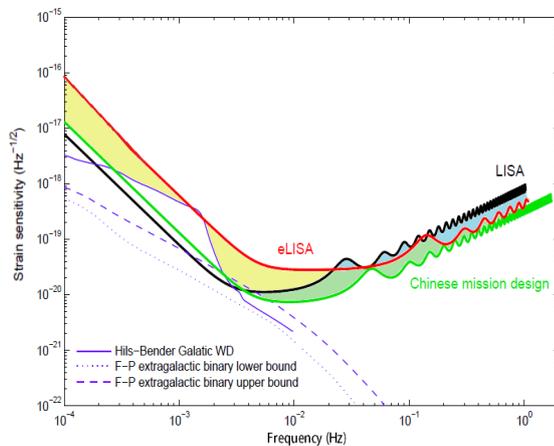


图 10 太极计划和 LISA/eLISA 探测频段灵敏度

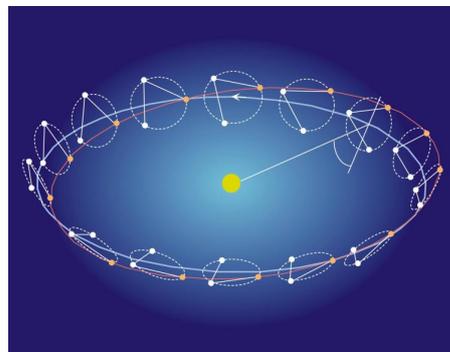
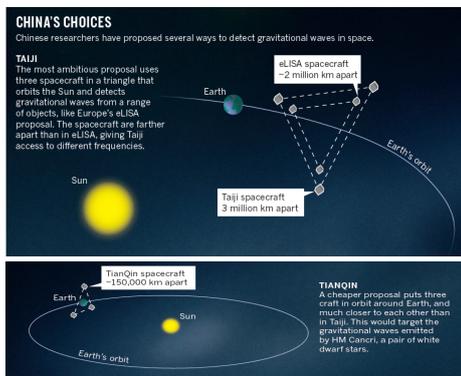
Strain sensitivity-应变灵敏度, Hils-Bender Galactic WD 河内白矮星生成的引力波背景, extragalactic binary lower (upper) bound-河外双星给出的下(上)限, Chinese mission design 中国任务设计

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 18~20 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(图 11a 上图)。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(图 11b)。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(见表 1)。航行器之间臂长为 3×10^9 米的情况下,需保证轨道游离小于 3×10^4 米,两臂夹角改变量小于 1 度。



表 1 太极计划设计指标以及与 LISA/eLISA 指标的对比

	太极计划(Taiji)	LISA	eLISA
探测器臂长	3×10^9 米	5×10^9 米	2×10^9 米
测距精度	5-10 皮米 赫兹 ^{-1/2}	18 皮米 赫兹 ^{-1/2}	11 皮米 赫兹 ^{-1/2}
激光功率	2 瓦	2 瓦	2 瓦
望远镜直径	~50 厘米	40 厘米	20 厘米
无拖曳水平	3×10^{-15} 米秒 ⁻² 赫兹 ^{-1/2}	3×10^{-15} 米秒 ⁻² 赫兹 ^{-1/2}	3×10^{-15} 米秒 ⁻² 赫兹 ^{-1/2}



(a) eLISA/太极(Taiji) / 天琴(Tianqin)卫星轨道比较示意图 (Credit: Nature) (b) 卫星组平面与黄道面成 60 度夹角运行示意图 (Credit: NASA)

图 11 eLISA/太极计划 / 天琴计划卫星轨道比较示意图

中科院空间太极计划与中山大学天琴计划在科学目标和探测手段方面各不相同。天琴计划发射的三颗卫星以地球为中心，在高度约 10 万公里的轨道上运行，构成一个等边三角形阵列，对一个周期为 5.4 分钟的超紧凑双白矮星系统产生的引力波进行探测（图 11a 下图）。天琴计划的这个观测源只是 eLISA 计划和太极计划作为标定源先期探测的组成部分。

五、揭示引力本质引发 21 世纪基础科学的革命性突破

尽管我们知道如何去计算引力，但我们不知道如何把引力与描述电磁力、弱作用力、强作用力三种基本作用力的粒子物理标准模型结合在一起，用量子场论来统一描述。爱因斯坦广义相对论作为狭义相对论的推广，借助弯曲时空动力学来描述引力，建立起引力与时空几何的内在联系，成为二十世纪理论物理划时代的进展。然而，以弯曲时空动力学为基础的广义相对论破坏了四维时空平移不变性，无法像狭义相对论那样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。为此，建立完整的量子引力理论成为半个多世纪以来重大前沿科学问题，不仅对理解早期宇宙的起源和演化至关重要，而且对量子理论本身的普适性和自洽性起着决定性的作用。超弦和圈量子引力等都是为探索引力的量子理论而提出和发展的理论。

正如牛顿运动定律和万有引力并没有错，只是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。爱因斯坦推广和超越牛顿定律，使之适用于接近光速运动的物体，帮助理解物质之间是如何传递引力相互作用。同样地，我们需要推广和超越爱因斯坦理论，很好地定义能量、动量、角动

量等守恒量以及时间和空间间隔等物理度量，帮助理解引力子的基本性质。

最近，有别于爱因斯坦广义相对论的假设，笔者提出双标架时空和引力场时空概念，基于宇宙基本组分由量子场构成、自然界基本规律应与时空坐标和标度选取无关并遵循局域规范不变的原理，在量子场论的框架下提出引力量子场论。引力量子场论可导出所有基本量子场的运动方程和所有对称性的守恒量，包括四维时空整体平移不变性和整体 Lorentz 转动不变性，能很好地定义能量、动量、角动量等守恒量以及时间和空间间隔等物理度量。由十六个引力场方程代替广义相对论的十个引力场方程。引力量子场论推广和超出爱因斯坦广义相对论，提供了广义相对论与量子力学统一的一种新途径，给出了统一描述引力、电磁力、弱力和强力以及自旋力和标度力的一个新的理论框架，并导致以量子暴胀宇宙为起源的时空动力学，可描述宇宙早期的量子动力学规律。引力量子场论在低能情况下的有效理论可导致爱因斯坦广义相对论，预言无质量的引力子以及有质量的自旋规范子和标度规范子。

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 γ 光子以及放射性粒子。从此，电磁波的各个波段，包括微波、红外光、紫外光直到 X 光和 γ 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离不开量子电磁理论的建立和电磁波的出现。

引力波的观测和研究，将使得人类的观测能力和观测手段得到进一步的拓展，并在宇观尺度上得到前所未有的延伸。同时，推进人类的测量技术从纳米（十亿分之一米）深入到皮米（万亿分之一米），使得在微观尺度上的测量精度得到前所未有的提升。引力波探测将有助于促进前沿交叉科学领域的发展，尤其是空间引力波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。引力波空间探测所发展的一系列高端空间技术，对惯性导航、地球科学、高精度卫星平台等具有重要应用前景。

六、结束语

二十世纪与电磁波和电磁力相关的两朵乌云：研究黑体辐射能量随频率分布的黑体辐射实验、探测光的传播介质“以太”的迈克尔逊-莫雷实验，导致了量子论和相对论的提出和发展。如果说二十世纪是电磁波和电磁相互作用得到深入研究和广泛应用的世纪，那么，二十一世纪将拓展为深入研究引力波和引力相

相互作用的世纪。二十一世纪与引力波和引力相关的乌云包括：暗物质属性、暗能量本质、黑洞的形成和宇宙暴胀的产生。

展开引力波精确测量将为我国引力波天文学、引力波物理和量子宇宙物理研究提供一个广阔的发展前景，对认识宇宙起源和时空结构具有革命性的意义。通过引力波精确测量可开展对宇宙大尺度结构、星系形成和演化过程进行深入仔细的研究。在对爱因斯坦广义相对论给出更精确检验的同时，可更好地研究强引力场的高度非线性行为。同时，为寻找超出爱因斯坦广义相对论的引力理论提供更直接和有效的实验数据，检验相关的量子引力理论，更好地发展和建立超越爱因斯坦广义相对论的量子引力理论，揭示引力本质，帮助理解暗物质和暗能量的性质、黑洞的形成和宇宙暴胀的产生。

参考文献

- [1] A. Einstein, "Näherungsweise integration der feldgleichungen der gravitation", Sitzungsberichte der königlich preussischen academie der wissenschaften Berlin, part 1: 688–696 (1916)
- [2] A. Einstein "über gravitationswellen", Sitzungsberichte der königlich preussischen academie der wissenschaften Berlin, part 1: 154–167 (1918).
- [3] B.P. Abbott et al. , LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger", Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 6.
- [4] David Reitze, "Opening lecture: Advanced LIGO and the Dawn of Gravitational Astronomy", and "The Next Detectors for Gravitational Astronomy", invited talks at KITPC program "The Next Detectors for Gravitational Wave Astronomy", April 6-May 8, 2015, Kavli Institute for Theoretical Physics China(KITPC), Chinese Academy of Sciences.
- [5] European Space Agency, Assessment Study Report, NGO: Revealing a hidden Universe: opening a new chapter of discovery, ESA/SRE(2011)19, December 2011.
- [6] Articles from eLISA Gravitational Wave Observatory, elisascience.org.
- [7] 胡文瑞, "空间引力波观测", 国家重大科技基础设施中长期重点建设项目建议, 2010年5月。

- [8] 刘润球等, “中国空间引力波探测计划任务概念研究报告”, 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 “空间科学预先研究项目”(XDA04070400), 2013.9.30
- [9] David Cyranoski, Chinese gravitational-wave hunt hits crunch time. *Nature*, 531 (2016) 150.
- [10] Yue-Liang Wu, “Quantum field theory of gravity with spin and scaling gauge invariance and spacetime dynamics with quantum inflation”, *Phys. Rev. D* 93, 024012 (2016).