

引力波会告诉我们什么 ——从 LIGO 首次直接观测到黑洞引力波说起

苏萌

麻省理工学院物理系/哈佛大学天文系, 美国马萨诸塞州剑桥市 02138

摘要 LIGO 宣布首次直接探测到引力波, 是一项震动世界的里程碑式科学发现, 它将开启引力波实验的新纪元。本文介绍直接探测引力波的意义、致密天体引力波的直接探测手段, 指出原初引力波的探测将是下一个值得期待的重大科学突破。介绍了探测原初引力波的意义以及即将在中国西藏阿里地区展开的阿里原初引力波探测实验, 并对引力波开启的天文物理的新时代做了展望。

关键词 引力波; LIGO; 黑洞并合; 宇宙微波背景辐射; 西藏阿里原初引力波实验

2016年2月12日, 位于美国路易斯安那州的列文斯顿和华盛顿州的汉福德建造的两个激光干涉引力波观测站 (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, 缩写为 LIGO, 图 1) 几乎同时探测到了来自于十几亿年前由两个黑洞并和产生的引力波, 震动世界! 这是人类第一次直接探测到引力波, 证实了爱因斯坦引力理论的最后一项预言, 可谓一项里程碑式的发现, 与此同时, 也开启了引力波实验的新纪元! 如果说 400 年前当伽利略第一次将亲手制作的望远镜指向夜空的时候, 人类开始用眼睛欣赏宇宙的瑰美; 今天, 我们第一次聆听到宇宙的音符。在不远的将来, 蓬勃发展的引力波探测装置, 即将呈现给人们的是宇宙美妙的交响乐章。

引力是自然界中一种最基本的相互作用力, 人站在地球上没有飘到太空中去, 靠的就是地球的引力。月亮围绕着地球转, 地球围绕着太阳转, 也都是“万有引力”的作用。事实上所有的物体互相之间都有引力, 两个物体之间引力的强弱跟它们的质量大小成正比关

系, 跟物体之间的距离成反比——这就是牛顿的万有引力定律。由于引力很微弱, 我们日常生活中几乎所有的现象主要受到地球、月亮、太阳的引力的影响。100 年前, 爱因斯坦极富创造力地写下广义相对论, 改变了物理学家对时空、对引力的认识。“物质决定时空如何弯曲, 时空决定物质如何运动”是对广义相对论最有名的通俗解读。爱因斯坦的广义相对论 100 年来历经考验, 接受了一代又一代物理学家和天文学家的反复推敲和实验、观测的验证。广义相对论预言了引力波的存在——任何

对时空的扰动都会以波动的方式传播, 被其他物质所感知。可是由于引力波太微弱, 历经数十年的努力, 终于被坚持不懈的科学家探测到。

1 为什么要直接探测引力波

在过去的一个世纪的时间里, 我们了解了恒星的诞生与演化, 星系的结构与分布, 大爆炸的遗迹宇宙微波背景辐射, 对宇宙整体的演化与发展有了革命性的突破。人类充分利用电磁波段广泛的频率作为工具, 研究宇宙演化各个阶段的各种天体物理过程。但是, 真正



图 1 位于美国路易斯安那州的列文斯顿和华盛顿州的汉福德建造的两个激光干涉引力波观测站

收稿日期: 2016-02-19; 修回日期: 2016-02-23

作者简介: 苏萌, Pappalardo Fellow/Einstein Fellow, 研究方向为宇宙和高能天梯物理, 电子信箱: mengsu@space.mit.edu

引用格式: 苏萌. 引力波会告诉我们什么——从 LIGO 首次直接观测到黑洞引力波说起[J]. 科技导报, 2016, 34(3): 34-38; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.03.003

主导宇宙中能量交换和“能源引擎”的是引力过程,而引力相互作用太弱,它的各种效应都只能被间接研究。引力波是引力传播的方式,是时空受到扰动产生的能量传播形式,就像电磁波之于电磁相互作用。如果说,电磁波发现一百多年来,深深地影响着人们生产生活的几乎每一个细节,实不为过。对引力波的直接探测,打开引力波研究宇宙的大门,是很多科学家数十年来孜孜不倦毕生追求的梦想。

引力波几乎不会受到传播过程中物质分布的影响,会携带着最有效、最原始、最可靠的天体物理信号,从遥远的宇宙中传来,是研究宇宙的一个极其重要的新窗口。比如我们可以研究黑洞在宇宙的早期到底是怎么形成的?恒星级的小黑洞形成后是怎么一步一步通过并合和吸积成长为几百万、几十亿太阳质量的庞然大物的?描述天体物理黑洞的参数只有黑洞的质量和黑洞的自旋,但是大量的黑洞质量和自旋统计上是如何分布的?随着宇宙年龄的增长有变化吗?黑洞的成长与演化跟星系的形成与发展有怎样密切的关系?银河系内存在大量的白矮双星、中子双星等等致密双星结构,包括双黑洞系统(比如 LIGO 发现的首个引力波源),这些系统到底是如何形成的,演化历史又是怎样的?另外一方面,到底爱因斯坦的广义相对论在这些极端条件、强场引力的环境下在多大程度上是精确的,真的一点偏差也没有吗?这些问题都需要对引力波的直接测量给出回答。

事实上,任何相对论性的引力理论都预言了引力波的存在。探测引力波有多种方法,大致来说可归于直接探测和间接测量。脉冲双星系统是两个离得很近的互相紧密环绕、快速旋转的致密中子星系统,首次于 1974 年发现后,科学家通过对它数十年如一日的观测,已经间接地探测到了引力波。通过射电望远镜的观测,天文学家发现,这个致密双星系统随着时间推移在慢慢地损失能量。既然没有其他已知的方式从这个系统中带走能量,对这个系统来

说能量应该是守恒不变的,那么能量会以什么形式损耗又传播出去呢?结果发现,爱因斯坦广义相对论预言的引力辐射带走的能量与脉冲双星系统损失能量一致!这个工作也获得了 1993 年的诺贝尔物理学奖。但这毕竟还是间接的探测。

2 致密天体引力波的直接探测手段

引力波的直接探测指的是观测到引力波对物质的直接作用。比如说,两个黑洞围绕着彼此相互旋转,越转越快、越靠越近,最后并合成一个黑洞(图 2)——这是天文学家预言的一定大量存在于宇宙中但多年来没有办法通过观测证认的天体演化过程。一旦宇宙中发生了类似剧烈的极端天体过程,就产生了引力波信号,就好比大功率扩音喇叭在宇宙的某个角落喊一嗓子,这种时空的“震荡”会以引力波的形式在宇宙间几乎毫无阻力地传播扩散,慢慢地随着距离变大,这种信号的强度越来越弱。你可以想象平静的湖面突然坠入一颗石子激起的涟漪荡漾在湖面,慢慢

传播开来又恢复平静。如果离地球足够的近,就可以用“引力波天线”接受这些信号,波动的强度,持续时间,波动的模式、形态,传播的速度等这些比较容易想象的到,可是测量起来却万分困难的物理量——原因很简单,引力波的信号实在是太微弱了。

探测引力波的主要手段目前共有 4 种,分别针对不同天体物理与宇宙学起源的引力波信号。当然要强调的是,引力波信号是引力波携带天文学信息的统称,各种探测手段的科学目标不尽相同。对天体物理的引力波信号的研究可以为研究极端的剧烈天体物理过程提供直接信息,通过测量这些信号的特征,研究诸如黑洞并合、演化等极端天体物理过程。就像地球时不时发生地震一样,这些引力波震荡在宇宙中也经常发生,可是我们需要一个好的“地震仪”才能探测到这些微乎其微的震荡。科学家们纷纷开始发挥聪明才智设计建造不同的“地震仪”。

致密天体系统发出的引力波有 3 种探测方式,可以按照引力波的频率来区分。首先是超大质量黑洞并合时发

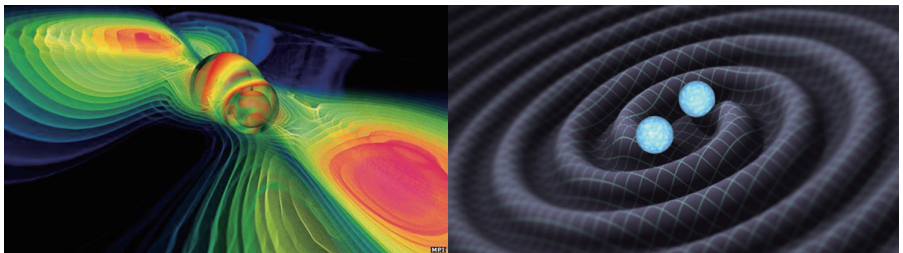


图2 双黑洞并合时发出的引力波

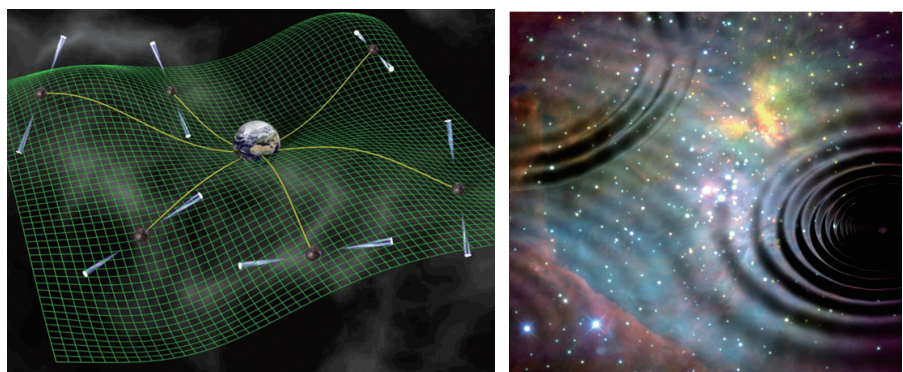


图3 左图为通过对银河系内近邻分布的毫秒脉冲星,作为监测引力波信号的探测器,右图展示的是这种探测方法可能看到的引力波成分:来自多个超大质量黑洞并合过程的叠加信号

出的引力波,对应的频率在 $10^{-6}\sim 10^{-8}$ Hz。这种事件往往发生在星系与星系相撞的后期,星系中心数百万到数亿太阳质量的巨大黑洞在最后阶段的撞击并合发出浩瀚的引力波信号,可是我们能建造的探测器太小了,哪怕把整个太阳系都当成探测器都无法测量。于是人们想出一个绝妙的方法,试图观测这种天体物理过程发出的引力波:利用校准后的毫秒脉冲星(图3)! 毫秒脉冲星是自转极快的带强烈磁场的中子星,顾名思义,脉冲之间的时间间隔就像钟摆摆动的时间一样可以作为记录时间的标尺,这种自然界天然的时钟精度可以达到原子钟的级别! 实际上很多国家已经开始发展利用这种脉冲星作为星际旅行的定位参照和导航等。若干这样精确校准的毫秒脉冲星在宇宙中排成校准源的一个庞大阵列,天文学家利用地面上的大型地面射电望远镜作为探测器监视着宇宙中可能经过的时空涟漪——寻找大质量黑洞并合时发出的引力波。

引力波的频率提升到 $10^{-5}\sim 1$ Hz,对应的信号来源则更为丰富,比如质量更小一些的大质量黑洞、银河系内的白矮双星系统等。这类引力波信号探测的手段也很强大:空间卫星阵列! 著名的LISA(光学干涉空间阵列)作为欧洲空间局批准的大型空间实验卫星项目(图4),将为实现这个目标再努力20年左右,计划2035年左右上天开始收集数据。其首颗技术验证星LISA pathfinder 2015年底刚由欧洲空间局送上太空,目前为止运行良好。中国也正在开展由中山大学领导的、雄心勃勃的“天琴计划”,以及由中国科学院领导的“空间太极计划”。这是中国正在规划中的空间引力波探测国际合作项目,是中国放眼基础科学前沿的一次重要尝试。

这次LIGO科学合作组宣布的首次引力波直接探测,是地面激光干涉手段探测引力波的主要代表实验,目标是几十到几千赫兹的高频段,主要的引力波信号源是中子星、恒星级黑洞等致密天体组成的双星系统并合过程。探测手

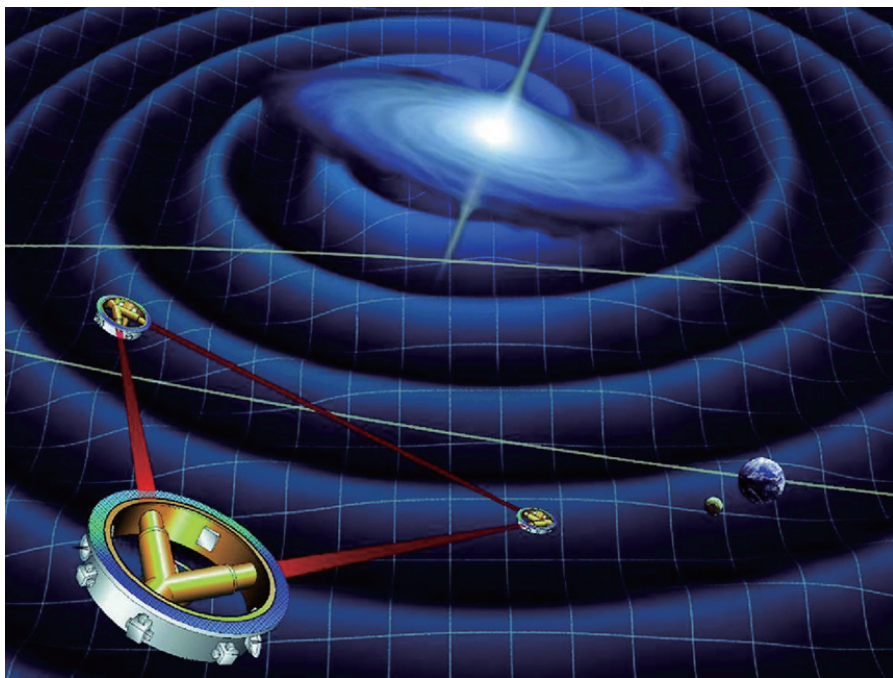


图4 星系并合后期往往伴随着星系中心超大质量黑洞的并合过程,释放引力波信号,通过空间卫星通过激光干涉手段探测引力波,是LISA的科学目标之一,图为欧洲空间局LISA项目的概念图

段就是地面数公里的激光干涉装置。但是由于引力波信号极其微弱,一直以来都在不断挑战着科学家探测技术的研发和数据分析模拟的能力。LIGO项目已经开展了20余年,经过了长期艰难的研究,攻克了一个又一个科学、工程、计算上的难关。LIGO合作组全面升级换代后的第二代增强版LIGO比上一代提升了10倍的灵敏度,搜索宇宙空间引力波事件的范围增大了1000倍。1000余人的合作队伍,正是面临诸多困难下科学家们多年艰苦努力的真实写照。

LIGO的科学家确信,他们探测到了来自两个恒星级黑洞并合的信号。北京时间2015年9月14日17:50:45,LIGO分别位于美国路易斯安那州的利文斯顿(Livingston)和华盛顿州的汉福德(Hanford)的两个独立探测器,同时观测到了一次置信度高达5.1倍标准差的引力波事件,命名为GW150914,不同的数据分析手段得到一致的科学结果更是增强了人们对这一发现确凿无疑的信心。根据LIGO公布的数据,该引力波事件发生于距离地球十几亿光年之外的一个遥远星系中。两个分别

为36和29太阳质量的黑洞,并合为62太阳质量黑洞,大约3个太阳质量以引力波辐射的形式释放出,这个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还要高10倍以上。详细结果发表于《Physical Review Letter》(doi:10.1103/physRev-Lett.116.016102)。

3 下一个重大科学突破——探测原初引力波

此次LIGO实验的重要意义在于在LIGO的工作频段证实引力波的存在,也就是说,引力波在其他广泛的频段都应该存在,而不同频段的探测对应完全不同的科学目标,在对应引力波频段的探测上建造领先的实验装置,就会在未来的引力波科学大发现上占据先机。前述的黑洞引力波是宇宙演化后期形成的天体物理极端环境产生的引力波。科学家相信,在宇宙诞生之初的瞬间也会产生引力波,称之为原初引力波。它是频率最低的引力波类型,主要是为了研究宇宙大爆炸时期的物理,到底宇宙是否发生过急剧的暴胀过程?能否用人类已掌握的物理学规律去理

解宇宙的诞生?这是研究原初引力波独特的科学目标,是其他引力波探测的手段都无法研究的内容。原初引力波作为唯一的来自宇宙最早期的引力波信号告诉我们极为重要的关于宇宙诞生之初的物理学过程,对它的探测是引力波物理、宇宙学、高能物理的下一个重大科学突破。原初引力波一旦被探测到将揭开探索早期宇宙论的新篇章。

原初引力波探测的科学目标和方式跟之前的3种引力波探测方式大相径庭。由于原初引力波不同于黑洞产生的引力波,所以探测方式是通过对宇宙微波背景辐射的观测实现的,跟LIGO的探测原理完全不同。有趣的是,除了运用空间望远镜探测引力波需要的时间周期更长,项目成本更大外,其余3种实验手段通过多年发展,可以说齐头并进,项目进展程度几乎相同,也就是说都有机会首先看到引力波信号。原初引力波的探测需要通过对宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)的观测,寻找CMB当中的“B模式”极化信息。

宇宙微波背景是宇宙大爆炸遗留下来的热辐射,其特征和绝对温标2.725 K的黑体辐射相同,频率属于微波范围。1964年美国射电天文学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊偶然发现宇宙微波背景,并于1978年获得诺贝尔奖。CMB显示出微小的温度涨落,对应着局部密度的细微差异。宇宙在年轻时期,恒星和行星尚未形成之前,等离子与辐射充满着整个宇宙,随着宇宙的膨胀而逐渐冷却。当宇宙冷却到某个温度时,质子和电子结合形成中性原子。这些原子不再吸收热辐射,因此宇宙逐渐变得透明起来。

宇宙微波背景辐射的研究在现代天文学、宇宙学以及高能物理学的发展中起着举足轻重的作用。CMB是宇宙大爆炸遗留下来的微弱光子辐射场,携带着丰富的宇宙学信息,几乎是人类认知极早期宇宙演化的唯一有效途径。CMB的发现不仅在半个世纪前开创了宇宙学,近年来对它的精确测量更是将人类带入“精确宇宙学”时代。CMB的



图5 位于美国南极极点观测站的BICEP2望远镜(背景是10 m的南极望远镜),两架望远镜在不同的空间分辨率观测宇宙微波背景辐射,是迄今为止最好的地面观测实验。

测量对探索当代宇宙学、高能物理及基础物理学最前沿问题,例如宇宙加速膨胀及“暗能量”的物理本质、“原初”引力波的探测、早期宇宙暴胀过程的物理机制等起到了核心作用,是最为精确有效的宇宙学“探针”。对CMB温度场空间各向异性的观测研究,极大地推进了人类对宇宙物质组分及早期演化的认知。

2014年曾经有一条新闻轰动科学界,南极的BICEP2实验(图5)发现原初引力波的“证据”。即便不是宣称发现了原初引力波,但该发现的影响力绝不亚于今天LIGO探测引力波的新闻,可谓轰动一时。首席科学家John Kovac被《时代》周刊选为2014年对世界最有影响的100位人物。当今的宇宙起源模型认为,宇宙大爆炸时会发生宇宙时空剧烈的“暴胀过程”,时空的剧烈扰动会产生一个引力波的背景信号,也就是“原初引力波”信号。这种引力波的波长跟整个宇宙的尺度差不多,所以只能通过通过对宇宙微波背景辐射中蛛丝马迹的缜密观测来寻找。如果BICEP2实验看到的迹象被证实,本将是首个观测到引力波对物质直接作用的实验。可惜后来更多数据和仪器的结果显示,BICEP2探测到的是银河系

的前景信号,而并非来自宇宙早期。

4 在世界屋脊聆听宇宙的初啼——阿里原初引力波实验

目前为止,地面上开展的CMB观测集中在发展相对成熟的智利天文台和美国南极科考站两个台址。北半球一直没有相应的CMB实验得以开展,原因就在于没有找到合适的、跟智利和南极站址观测条件相比拟的北半球台址。中国正在计划开展的西藏阿里原初引力波实验,将利用阿里地区独特的地理气象条件,实现首次对北半球可见天区的原初引力波搜寻,是中国独具特色的引力波研究项目。比如美国本土无法开展类似的探测活动,只能通过美国在南极的科考站或借助智利的天文平台进行南半球的观测活动。阿里项目使用的是一台微波波段的望远镜,通过极其敏感的探测元器件,排除地球大气和银河系的干扰,搜寻从137亿年前跨越整个宇宙传播的宇宙微波背景辐射。

2014年,以中国科学院高能物理研究所主导的研究团队提出,在中国西藏阿里地区开展原初引力波探测实验。地面CMB观测实验对所在台址大



图6 西藏阿里天文台
(西藏阿里天文台台长姚永强供图)

气条件要求严格,阿里地区具有得天独厚的地理环境优势、观测气象保证与基础设施条件,可提供北半球最好的观测台址。大气中所含水汽是CMB观测的主要噪声来源,水汽不仅吸收CMB光子,而且在CMB观测频段产生大量噪声辐射。阿里天文台位于西藏阿里地区狮泉河镇以南约20 km处,海拔5100 m的山脊,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同时具备望远镜建设与运行基础的台址。阿里天文台(图6)经过国家天文台2009年以来的发展建设已经相对成熟、初具规模,而且其地理上位于最佳的中纬度范围,充分利用地球自转,覆盖天区广。

目前,国内多家单位,包括中国科学院高能物理研究所、国家天文台、紫金山天文台、南京天文与光学仪器所、微系统与计算科学研究所、理论物理研究所、中国科学技术大学、北京大学、清华大学等多家研究机构都参与其中,计划通过中美合作的方式来具体实施。目前美国哈佛大学、麻省理工学院、芝加哥大学、斯坦福大学、明尼苏达大学等单位已经开始进行项目的筹备与科学团队的建立。中美双方的科学家已经开展多次科学论证与项目研讨。2015年11月在美国劳伦兹伯克利国家实验室举行的第36次中美高能物理会议上,中国科学院高能物理研究所与美国能源部下属的四大实验室(SLAC、

LBNL、FNAL、ANL)签署了在CMB原初引力波探测技术及科学、西藏阿里台址监测等方面进一步合作的协议。

引力波被LIGO首次直接探测到,证明了引力波的存在,我们可以满怀信心地去寻找不同波段的引力波,就像不同波段的电磁波谱一样。阿里原初引力波计划是寻找频率最低的宇宙诞生之初产生的引力波,探测到它是下一个引力波领域、宇宙学、高能物理的重大突破。

5 引力波天文学的新时代

引力波的发现为我们打开了研究宇宙的全新窗口。射电、光学、红外、紫外、X射线、伽马射线等等不同的电磁波谱研究宇宙都是来自于光子携带的信息,引力波携带着与电磁波截然不同的信息,将为我们揭示宇宙新的奥秘,比如黑洞与黑洞并合时的物理过程。宇宙大爆炸时发出的原初引力波如果被探测到,将为我们揭示宇宙诞生之初的奥妙。从国家的科学发展来讲,引力波这一探索宇宙的全新窗口,是中国发展基础科学的重要机遇期。抓紧时代的机遇发展中国基础科学研究,在人类探索自然的进程中留下中国人坚实的脚步,是中国科学家的时代使命与历史重任。在空间引力波探测方向的“天琴计划”和“空间太极计划”将聆听宇宙演化的交响乐,而“阿里计划”对原初引力波的搜寻将有机会听到宇宙诞生的初啼。期待在不远的将来,我们将“听到”宇宙诞生时那远古壮美的交响乐章!

(责任编辑 李娜)