

**[编者按]** 《赛先生》微信公众平台于2014年7月发起,它讲述科学家的故事,介绍科普知识,也传递科学的态度,不仅是科学家们建言国家和社会的平台,也是一份颇具可读性的科学读物。《科技导报》从2015年第13期开始,与《赛先生》合作,每期选取1篇《赛先生》发布的高质量原创文章,与读者分享,“与科学同行”。

## 待引力波拨动了“天琴”的弦

### 音乐会中那一承上启下的乐章

爱因斯坦堪称物理学界最重要的主角之一。继1915年提出广义相对论后,他成功地将相对性原理推广至一切参考系。广义相对论描述了时空弯曲如何受物质决定,物质运动如何受时空弯曲的影响。它革新了人类对于时空本质的经验认识。

要想人们从理性上接受它,必须提供出可靠的证据。爱因斯坦在广义相对论提出之初采用了两种方式:解释当时现有的难题,提出预言供检验。

当时,观测发现水星的近日点进动的值比利用牛顿定律计算的结果多出了43.11角秒(1角秒是1/3600角度)。天文学家试图用其他天体对水星运动的影响来解释这多出的进动值,都未成功。直到1916年,爱因斯坦根据广义相对论,成功解释该问题,预测的进动值与观测结果很接近。这是对广义相对论的有力验证。

1915年,爱因斯坦预言,当一颗恒星发出的光经过太阳时,由于太阳造成的时空弯曲,沿着最直接路线运动的光实际上已偏离了原来的入射路线,偏离角度约为1.75角秒。经历了多番坎坷,终于,在一定的误差范围内,这一预言得到了日全食观测结果的验证。

另一个广为人知的爱因斯坦预言是引力红移,同样也得到了科学家们的观测检验。它们共同推动了物理学界对广义相对论的广泛接受。归根结底,这三者对应的都是时空弯曲的反映。物质的质量引起时空弯曲,如果该物体还在加速运动呢?时空弯曲的程度发生变化,表现成以光速向外传播的引力波。这个预言早在1916年爱因斯坦就提出过。在广义相对论被广泛接受之后,科学家们一直试图去探测引力波。如果把广义相对论的验证比作一场音乐会,引力波的探测历程就好像承上启下的乐章,也许前奏低沉甚至失落,但中间定会激情高昂。

在它之前,广义相对论已初步成功验证,并应用到各个方面(例如GPS);在它之后,引力波如果被我们探测到,会怎么样呢?

### 引力波:我辈岂是蓬蒿物

关于引力波可能带来的科学新发现,让人畅想的内容很多。过去所做的大部分天文学研究是基于不同形式的电磁波,但是电磁波容易被介于目标天体和观测者之间的物质散射或吸收等。最简单的例子是地球大气的消光影响。如果观测手段是引力波,由于宇宙相对于它们近乎透明,影响微弱,人类将可能观测到在其他方式下被阻挡的天体,以及并没有产生电磁辐射的天体现象。

也许有一天,我们可以通过引力波追溯到宇宙的极早期,甚至是宇宙大爆炸之后 $10^{-36}$ ~ $10^{-32}$ 秒,而今天人类探测到的宇宙微波背景辐射只是大爆炸之后30万年。引力波将帮助探索物理上一些重大问题,例如:广义相对论是否正确描述了引力?超新星

爆炸时的具体细节是怎样的?超新星爆炸后,中子星或黑洞是如何诞生的?双黑洞碰撞前后以及碰撞瞬间究竟发生了什么?

技术会推动新发现,然而,探索新发现这样的应用需求也会驱动技术的发展。2014年10月13日举行的东方科技论坛上,上海理工大学光电学院院长庄松林院士就探测引力波这一领域,建议我国建造第二代激光干涉引力波探测器,参与国际的合作与竞争。他认为,这种耗资巨大的项目是值得的,因为探测到引力波必然是基础物理学的巨大突破,而且建造探测器所需要用到的大功率稳频激光器、超高反射率薄膜、超高精度光学元件等技术,会提升我国在这些领域的科技水平,也会使其他工程受益。“天琴”计划将担当起该重任。

无独有偶,清华大学信息技术研究院研究员曹军威也有略同的英雄所见。他曾经在美国麻省理工学院空间研究中心工作从事引力波探测和数据分析工作,2006回国创建了清华大学LIGO(激光干涉引力波天文台;Laser Interferometer Gravity Observatory)工作组。根据多年参与引力波探测工作积累的经验,他认为,科学探索的需求一直是计算机技术发展的驱动力之一。他说:“我们参与LIGO项目也是希望从应用驱动的角度开展先进计算技术的研究工作,LIGO引力波数据虽然没有高能物理方面的数据量大,但其处理要求非常高,对计算技术的挑战非常大,我们参与其中可以掌握第一手的应用需求,有的放矢地开展计算机应用技术研究。”

### 路漫漫,上下而求索

国际上这场引力波探测的比赛自20世纪60年代就已开始,时至今日比赛仍在继续。虽然目前仍然没有引力波的直接探测证据,但不乏一些带来鼓励的间接证据。

1993年被授予诺贝尔物理学奖的工作便是引力波研究历程中的一座里程碑。故事中的主角是两颗小尺度的天体,半径仅几十千米,质量与太阳相当,两者之间相隔大约几倍月地距离。它们围绕彼此快速转动。经过足够长时间的观测,科学家们发现它们彼此绕转的速度越来越快,绕转一圈所需的时间(轨道周期)变短,大概每年会变短百万分之一秒。根据广义相对论,轨道周期之所以会不断缩短,是因为系统中的两个天体在彼此绕转靠近的过程中,以引力波的形式释放能量,从而成功地间接证明了引力波的存在。

### 韦伯棒

引力波,本质上是弯曲时空的传播。为了直接探测到引力波,马里兰大学的约瑟夫·韦伯设计制造出实心铝棒引力波探测器,主体是两根长2 m、直径1 m的实心铝棒。韦伯认为,当引力波的频率与实心铝棒的谐振频率相近时,微弱的引力波信号将被放大至可探测水平。1969年,韦伯发表论文,称他的铝棒引力波探测器接收到来自银河系中心的引力波信号。

韦伯的发现以及他的数据处理细节遭到其他科学家的质

疑。尽管如此,我们今天还是应当铭记韦伯,感谢他当年的决心、坚持和努力,感谢他的工作吸引更多的科学家进入引力波探测的队伍。后来,人们在仪器上做了更多改进以提高其灵敏度,但至今仍未能看到任何引力波信号。

### 激光干涉方法

1962年,有科学家提出用激光干涉方法探测引力波。如果一个物体受到引力波的影响,那么它将在一个方向上被压缩,而在另一垂直的方向上被拉伸。

### 激光干涉地面引力波探测器

目前最先进的引力波地面探测器均呈L型,利用激光干涉技术,通过研究激光束的干涉条纹,来探索两臂相对长度是否受引力波的影响而变化。

美国目前有两个这样的激光干涉引力探测器,分别在华盛顿的汉福德和路易斯安那的利文斯顿,两者相距3002 km,它们共同组成的系统名为激光干涉引力观测站(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)。国际上同类的地面引力波探测器还有意大利、法国合作的Virgo,德国的GEO和日本的TAMA等。

以其中最大、灵敏度最高也是实施最早的激光干涉引力观测站为例,它的工作过程如下:对于其中一个L型探测器,两臂长度均为4 km,一束激光在两臂的交叉处被分光镜分为相互垂直的两束。由于在交叉处和每一条臂的末端都垂放着反射镜,因此两束激光将在两臂间来回反弹,最终回到交叉处,发生干涉。如果两臂的长度保持不变,那么最终将干涉相消,即最终在输出上看不到干涉信号。但是,如果引力波轻微地拉伸一条臂,压缩另一条臂,相互干涉的两束激光束将不能彼此相消,干涉结果将被显示。输出的信号中就蕴含了两臂的相对长度变化,进而告诉我们引力波的信息。

但是仅靠单个探测器无法确定引力波源的位置,因为单个探测器在单次观测时接收的信号来自于一大片天区,而不是定向的某个位置。如果处于不同位置的2个以上的探测器,接收到引力波的时间会有一定的差别,就可根据时间延迟以及已知的探测器间相对位置来定位引力波源。而且多个探测器的探测还可以排除一些干扰项“伪造”的疑似引力波信号。如果某个引力波探测器收到了引力波信号,但是在时间延迟范围内另一个探测器却没有收到,科学家们就该想想这个引力波信号是真是假了。

激光干涉引力观测站真正的观测始于2002年,结束于2010年。在频率为100 Hz处,LIGO的灵敏度已达到 $1/10^{21}$ ,相当于能分辨出一根长4 km的臂变化 $10^{-18}$  m,这是极其微小的长度变化,比电子还要小近千倍。理论上,激光干涉引力观测站可以看到的引力波现象包括:距离几十万光年之外的两颗中子星绕转靠近直至并合过程所发出的引力波,超新星爆炸或伽马射线暴产生的爆发式引力波,以及宇宙早期演化中残留下的引力波信号等。但历时9年激光干涉引力观测站并没有直接探测到引力波,它将被升级版“Advanced LIGO”,灵敏度将提高至原来的十多倍。

### 引力波探测的空间计划

地面激光干涉探测器在低频率波段的灵敏度会受到实际臂长和地面噪声的影响。不同频率范围的引力波对应的天体过程一般也不同,例如低频率的引力波可能来自于银河系中致密双星系统,其他星系中的双黑洞或者一颗不断绕转靠近超大质量黑洞的小质量致密天体等。

为直接探测到低频率的引力波,2000年,欧洲航天局(ESA)

宣布将与美国航空航天局(NASA)合作共同实施“激光干涉空间天线(Laser Interferometer Space Antenna, LISA)”计划,预计发射3艘宇宙飞船,构建一个边长为500万 km的巨大三角形,飞船运动的轨道类似地球绕日的轨道。2011年4月8日,NASA宣布由于资金问题选择退出,随即ESA进行调整,作出了新的eLISA计划,三角形的边长调整至100万 km,暂定于2034年发射卫星。

### 立足国内,放眼世界

1970年代,著名物理学家周培源发表文章指出要重视基础物理研究,要在中国开拓关于引力波的探索。

中山大学引力物理研究室建设了引力波探测器,其测量灵敏度也位处国际同类探测棒水平前列。1979年7月,中山大学的陈嘉言教授在第二届格拉斯曼广义相对论国际会议上作了报告,介绍中国的引力波探测工作的进展,得到了国际同行的认可。

20世纪80年代末,曾经活跃在引力波探测领域的专家或退休或转行,该领域逐渐被放弃,近乎空白了十多年。

2008年,在中国科学院力学研究所国家微重力实验室胡文瑞院士的推动下,中国科学院多个研究所及院外科研单位共同成立了中国科学院空间引力波探测工作组,开始探索中国空间引力波探测的可行性。这一项目被列入中国科学院空间科学2050年规划。

2014年3月,天琴空间科学任务的概念被提出,其主要科学目标是直接探测爱因斯坦广义相对论预言的引力波以及精确测定后牛顿参数。

随后,第一届天琴空间科学任务研讨会于2014年12月8日至9日在华中科技大学引力实验中心召开。来自莫斯科大学、中国科学院、中国科学技术大学、紫金山天文台、东方红卫星公司、华中科技大学等单位的40余位专家学者参与研讨,重点讨论天琴空间科学任务的科学目标、关键技术以及计划安排。

2015年5月17日,第二届天琴空间科学任务研讨会在中山大学珠海校区举办,该研讨会正式启动了天琴计划的立项申请工作。

根据目前设想,“天琴计划”主要将分4阶段实施:第一阶段完成月球/卫星激光测距系统、大型激光陀螺仪等天琴计划地面辅助设施;第二阶段完成无拖曳控制、星载激光干涉仪等关键技术验证,以及空间等效原理实验检验;第三阶段完成高精度惯性传感、星间激光测距等关键技术验证,以及全球重力场测量;第四阶段完成所有空间引力波探测所需的关键技术,发射3颗地球高轨卫星进行引力波探测。

天琴项目还处于起步阶段,势必面临诸多挑战。但挑战意味着机遇,相信天琴空间计划的顺利开展,将推动诸多领域向前进步,让中国的引力波探索更上一层楼。

最后,以清华大学曹军威研究员送给天琴计划的话结束此文:中国在引力波探测方面的工作是空白,任何相关努力都值得鼓励,一个建议是要脚踏实地从培养人才入手,国内真正懂引力波实验的学者屈指可数,另外就是要有开放合作的心态,充分借鉴国际上已有的研究和实验成果,而不是故步自封;祝愿“天琴”计划早日成功实施。

文/左文文

作者简介 中国科学院上海天文台,博士。

(编辑 王丽娜)