

人类首次直接探测到引力波——广义相对论和天文学的又一个里程碑



许甫荣

北京大学物理学院教授, 博士生导师。分别于1984年、1987年、1993年获北京大学学士、硕士、博士学位。1995~2000年分别在瑞典和英国从事博士后研究工作。2005年获国家杰出青年科学基金。2001~2015年担任北京大学物理学院技术物理系主任。现任中国-美国“奇特核”理论物理研究所(CUSTIPEN)执行主任, 北京大学-中国科学院兰州重离子国家实验室联合核物理中心主任, 教育部高等学校核工程与核技术教学指导委员会副主任委员, 核物理与核技术国家重点实验室副主任, 英国萨瑞大学客座教授。自2014年起担任《科学通报》副主编。

100年前, 爱因斯坦建立了广义相对论, 预言了引力波的存在。根据广义相对论, 引力波是由于时空扭曲而产生的一种以光速传播的时空波动, 如同石头丢进水里产生涟漪一样。从20世纪50年代开始, 科学家们一直在努力探测引力波。但由于引力波传播到地球时已经极其微弱, 所以实验探测异常困难。从理论上讲, 物体质量越大, 运动速度越大, 造成的时空曲率变化越严重, 产生的引力波也越强, 传播得也越远。这好比石头越重, 入水速度越大, 产生的涟漪越明显, 传播得越远。引力波是爱因斯坦广义相对论的预言信号, 根据牛顿的引力理论, 引力波是不存在的, 所以探测引力波对广义相对论的验证是极其重要的。

在宇宙中, 高速转动的大质量双星系统相对比较普遍, 比如白矮星、中子星或黑洞组成的双星系统, 它们是理想的引力波波源。双星绕着它们的共同质心转动, 产生引力辐射。辐射使双星动能减少, 造成轨道的缓慢收缩。两颗星逐渐接近, 最后发生猛烈的接触合并成一个质量更大的星体(或者是黑洞)。在合并过程中, 有相当部分的质量以引力波的形式释放, 所以这个过程是探测引力波的最佳时机。不过, 由于距离地球非常遥远, 所以引力波到达地球时还是非常微弱的。

振奋人心的消息终于到来。2016年2月, 在爱因斯坦提出广义相对论并预言引力波存在的百周年之际, 美国激光干涉引力波天文台(简称 LIGO)宣布: LIGO 装置探测到了引力波。这是人类历史上首次直接探测到引力波, 对物理学乃至整个科学界都是一件激动人心的大事件, 对人类探索宇宙和相对论天体物理过程具有极其重要的意义。这次的引力波信号被位于美国的相距 3000 公里的利文斯顿和汉福德两架 LIGO 激光干涉仪几乎同时捕捉到。通过信号分析, 这束引力波来自位于距地球约 13 亿光年的双黑洞并合过程。这两个黑洞的质量分别约为太阳质量的 29 和 36 倍。它们经过相互的高速旋转后, 并合为质量约为太阳 62 倍的更大黑洞, 但约有 3 倍太阳质量的能量在不到 1 秒的时间内以引力波形式释出。

60 多年来, 物理学家和天文学家为证明引力波存在做出了无数的努力, 从早期的共振棒探测器到现在的先进激光干涉探测仪。引力波的间接证据发现于 20 世纪 70 年代。美国物理学家赫尔斯和泰勒于 1974 年发现首个脉冲双星系统, 并通过观测发现了引力波存在的间接定量证据, 因此两人获得 1993 年诺贝尔物理学奖。而这次 LIGO 探测到的引力波直接证据具有划时代意义。

目前, 主流的引力波探测器都是基于迈克耳逊激光干涉仪原理。除了美国的 LIGO 装置之外, 还有欧洲的 GEO600 和 VIRGO、日本的 KAGRA 等。科学家们还在积极计划太空激光干涉引力波探测装置。利用卫星技术, 可以使激光干涉臂长增加到数十万公里乃至数百万公里, 这可以增加探测灵敏度。比如,

筹划中的欧洲 eLISA 将安置 3 个相同的探测器在 3 颗卫星上, 构成一个边长为 500 万公里的等边三角形, 同样使用激光干涉法来探测引力波. 我国也在计划 3 个大型引力波探测项目: “太极计划”, 它非常类似于 eLISA 计划; “天琴计划”, 它由 3 个间距大约 10 万公里的卫星构成, 测量目标是已知的双星系统; “阿里计划”, 在西藏阿里地区放置一个小型但具有大视场的射电望远镜, 用来探测宇宙微波背景中 B 极化模式.

引力波像其他形式的波一样, 携带着能量和信息. 宇宙背景微波辐射只能让我们看到宇宙大爆炸 38 万年之后的景象, 而引力波能够让我们回望宇宙大爆炸最初瞬间, 检验宇宙大爆炸理论的正确与否.

引力波必将像电磁波开启电磁学一样, 引发一场天文学革命. 引力波将继续传统电磁波天文学、宇宙线天文学和中微子天文学之后, 为人类认识宇宙开启一个全新窗口, 迎来引力波天文学时代.

在爱因斯坦建立广义相对论并预言存在引力波的百周年之际, 为宣传人类利用 LIGO 装置首次直接探测到引力波之大事, 《科学通报》邀请广义相对论和天文学等方面的专家学者撰写文章, 向广大读者介绍引力波方面的知识, 让科学走向民众.

许南荣

北京大学物理学院