

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