

· 访谈 ·



蔡荣根(右)员与LIGO发起人基普·索恩在2011年第七届国际引力和宇宙学会议上合影

蔡荣根,中国科学院理论物理研究所研究员,中国引力和相对论天体物理学会理事长,国际广义相对论和引力联合会IUPAP代表。研究方向为引力理论、黑洞物理、宇宙学、超弦理论等。

# 蔡荣根:探测到引力波的意义

2016年2月11日,也就是爱因斯坦预言引力波后100年,美国科学家宣布,他们利用激光干涉引力波天文台(ALIGO)于去年9月首次探测到引力波。《科技导报》第一时间采访了中国科学院理论物理研究所研究员蔡荣根。

## 发现引力波的科学价值

此次发现引力波,引发了公众极大的关注度,蔡荣根认为最重要的两个科学价值,一是第一次直接探测到了引力波。在20世纪70年代科学家测量到脉冲双星轨道周期的改变,与广义相对论的预言一致,这是引力波存在的间接证据。二是第一次直接得到了黑洞存在的证据。此次探测到的引力波,是由两个黑洞并合产生的,这直接证明了黑洞的存在,而之前探测黑洞也是通过间接方法探测的。这也验证了在强引力场时爱因斯坦广义相对论的正确性。

## 发现引力波早于预期

早在2015年9月时,就有消息传出,说探测到了引力波,但一直没有得到官方证实,因为需要进行大量数据验证。之后,LIGO研究人员经过5个月的紧张工作,终于在爱因斯坦提出引力波后100年,宣布首次探测到了引力波。

蔡荣根说,“美国最初建立引力波

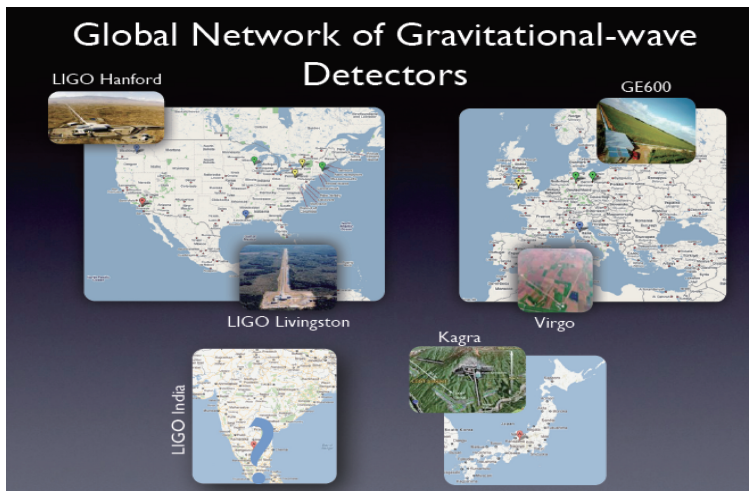
探测项目的时候,也是很困难,一是花费大,二是不知道什么时候能探测到。这次很幸运的是引力波的振幅比较大,为 $10^{-21}$  m量级,因为发生并合的两个黑洞质量也比较大,所以产生引力波的振幅也比较大。”

2010年,LIGO进行了为期5年的重大升级改造,改造之后的探测器灵敏度比先前的提高10倍,称为“先进LIGO”(ALIGO)。这次探测到的引力波是于2015年9月14日探测到的信号。早前理论预测引力波的振幅达 $10^{-22}$  m以上才有可能被探测到,因此比较乐观的预期是在2017—2018年探测到引力波,研究人员没想到这么快,在改进的探测器正式运行之前就探测到了。

意大利和法国合作的VIRGO项目的探测器由于没在探测期间,德国和英国合作的GEO项目的探测器因为灵敏度的问题,都没有探测到此次的引力波。

## 此次引力波探测的可信度

由于此次引力波只有美国的ALIGO设备探测到了,而其他引力波探测设备没有探测到,因此也引起了一些质疑。对于这个疑问,蔡荣根认为支持此次引力波探测的两个有利证据,一是分别在路易斯安那州利文斯顿市与华盛顿州小城汉福德市建造的相距3000 km的两个引力波探测器都探测到了。二是Fermi GBM 探测器在这个引力波



地面引力波探测网络

事件(GW150914)之后 0.4 s, 观测到了一个弱的短暂的 X 射线-伽马暴。此事件也与引力波产生可以作为相互的验证。

此次探测到的引力波信号, 与广义相对论理论模型的预期一致。根据此次观测到的引力波, 可以推测出是由两个黑洞碰撞发出的, 并可以推测出黑洞的质量, 但由于此次只有两个探测器探测到了引力波, 因而无法对引力波产生源的位置进行精确定位。

### 是科学工程的巨大进步

广义相对论的提出和爱因斯坦预言引力波已经一个世纪了。“这次引力波的直接观测更重要的是体现了科学技术的巨大进步。这里涉及到低温、真空、激光、材料等方面的技术进步。此次引力波的发现也得益于计算机运算能力的巨大发展。”现在人们利用计算机可以模拟二个黑洞的并合过程。这一程序对这次引力波的发现起到了关键性的作用。引力波探测的主要难度是信号太弱, 这次的引力波是在 4 km 的长度上探测到 1/1000 个质子直径尺度上的变化。因此 1916 年爱因斯坦提出引力波的概念时, 是没有预料到可以探测到引力波的。

### 探测到引力波后的问题

此次探测到的引力波, 与爱因斯坦广义相对论是符合的, 但是不是真正符合? 还有待于精确的检验。以前广义相对论的检验主要是在太阳系内, 引力场较弱, 而这次是在太阳系外, 黑洞产生的引力场, 引力场较强。这是第一次在强引力场检验广义相对论。利用宇宙尺度上引力波的传播, 可以检验洛伦兹对称性频率与能量之间的关系, 引力子是否有质量。利用黑洞并合产生的引力波, 可以检验我们对黑洞物理的理解, 如黑洞无毛定律, 黑洞的量子性质等。

21 世纪宇宙学三大挑战——暗物质、暗能量、暴胀模型。暗物质, 表明现有粒子物理的模型是不完备的。暗能量, 可以用宇宙学常数来解释, 但宇宙学常数为什么这么小? 暗能量是否是随时间演化的, 目前仍不清楚。暴胀模型, 是什么能量使宇宙极早期加速膨胀起来的? 这些问题目前都没有很好的理解。

引力波是与宇宙学紧密相联系的, 研究引力波, 就可以得到宇宙、星系演化的信息, 探索宇宙的规律。将来引力波甚至可以携带、传输信号, 但现在只是探测出来第一个结果, 还为时尚早。

### 探测原初引力波的重要性和难度

发现引力波后, 接下来的工作方向有哪些呢? 蔡荣根说, 一是探测其他不同波段(也就是不同起源)的引力波, 就可以知道不同的物理过程; 二是测量更小能量的引力波。其中最受关注的是原初引力波的探测。原初引力波是宇宙暴涨时产生的引力波。现在观测的微波背景辐射, 已是宇宙形成 38 万年后了, 而在 38 万年之前的信号探测不到。

如果可以观测到原初引力波, 就可以得到宇宙刚形成时的信息, 对宇宙演化的历史就更清楚了。如果原初引力波得以证实, 就可以验证暴涨模型的正确性。

原初引力波探测的难度非常大, 主要难度在于理论上不知道张量振幅对标量振幅之比  $r$  (简称张标比) 的大小。根据现在的观测限制,  $r < 0.07$ 。日本准备发射一颗卫星探测原初引力波, 探测精度预计  $r \sim 0.001$ 。如果  $r < 0.001$ , 现有技术就无法探测到原初引力波了。“如果  $r$  非常非常小, 这在理论上是不自然的。”一般相信张标比会大于 0.001。这样应该在不远的将来观测到原初引力波。

文/傅雪(《科技导报》编辑部)