

引力波来了

(中国科学院半导体研究所 姬扬 编译自 Sung Chang, *Physics Today*, 2016, (4): 14)

相距3000 km的两台激光干涉仪，几乎同时听到了远方的召唤——激情共舞的两个黑洞，终于胜利会师，唱响了嘹亮的战歌。

2016年2月11日，激光干涉式引力波观测项目(LIGO)负责人宣布，“我们检测到了引力波。我们成功了！”四十多年艰苦卓绝的研究工作，终于取得了辉煌的成就。

上世纪60年代，麻省理工学院的Rainer Weiss提出，可以用干涉仪测量引力波。1972年，Weiss在一份内部报告中，讨论了长度为几千米的激光干涉仪，列出了所有可能的噪音来源。1983年，他和加州理工学院的Ronald Drever和Kip Thorne组成团队，提出了LIGO的

初始方案。1990年，美国自然科学基金委员会批准建造LIGO观测站。经过近10年的努力，建成了两台4 km长的设备，分别位于路易斯安那州的列文斯顿和华盛顿州的汉福德，两地相距约3000 km(汉福德还有一台2 km长的干涉仪)。在此期间，3人小组成长为LIGO实验室。1997年，LIGO科研团队成立，目前拥有来自于83个国家的1000多名科学家。

大约13亿年以前，在非常遥远的地方，两个黑洞融合了，形成了一个更大的黑洞。这两个黑洞的质量分别是太阳的29倍和36倍，而融合后的黑洞质量相当于62个太阳——大约3个太阳质量的能量转变成了引力波。

2015年9月14日，当地时间早晨5点51分，引力波到达了列文斯顿观测站，7 ms以后，又抵达了汉福德观测站。这就是GW150914引力波事件，它持续了0.2 s(图1)，精彩地证实了爱因斯坦关于引力波的预言。

激光干涉仪

引力波被称为是空中的涟漪，它是时空张量的振荡，与电磁波有很大差别。引力波使得时空在一个方向压缩、另一个方向舒展。

LIGO的干涉臂长达4 km，是世界上最大、最灵敏的迈

克耳孙干涉仪。路过的引力波改变了两条干涉臂的长度差，从而改变了两束光的干涉结果。

观测到的相对变化只有 10^{-21} ，意味着LIGO干涉臂的长度变化只有原子核直径的1/1000。这也太小了，怎么能测量到呢？LIGO把每条干涉臂变为光学共振腔(图2)。光在共振腔里来回跑上几百次才进行干涉——光的行程由4 km增大到1000 km以上，而光程差相应地增大到了fm(10^{-15} m)的量级。

关键是信噪比。在LIGO探测频段(10 Hz—7000 Hz)的高频区，噪音主要来自于光子数的量子涨落。因为LIGO在光探测器处接近于完全相消干涉，几乎所有的光最终都返回到激光入射的方向。LIGO把这些光重新反射回到系统里循环再利用，从而使得20 W的激光功率增大到了每条干涉臂上的100 kW(包括光学共振腔的贡献)。

在更低的频率范围内(150 Hz以下)，振动、热胀冷缩、光压的起伏等更重要，必须尽可能地消除这些噪音。从2010年到2014年，这些设备进行了彻底检修，升级为Advanced LIGO。安装了一套主动式减振系统，光学共振腔换上了40 kg的镜子(原来是11 kg)，从而减少了热胀冷缩和光压起伏导致的噪音。这些镜子都挂在“四级悬摆隔振系统”上，进一步提高了隔振效果。

探测到GW150914事件时，LI-

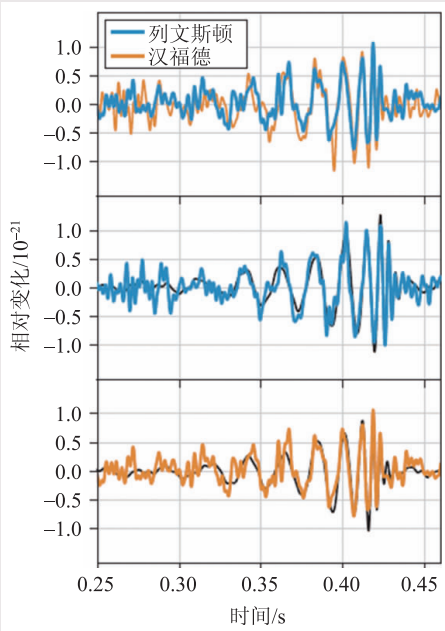


图1 列文斯顿和汉福德的LIGO首次直接探测到引力波。上图是它们的观测信号，汉福德信号在时间轴上移动了(补偿引力波到达两处的时间延迟)，符号也颠倒了(因为两台干涉仪的方向不同)。下面两图是两处各自的观测数据，以及对论数值模拟得到的最佳拟合结果(黑色曲线)

GO 运行在低功率模式下。2019 年, Advanced LIGO 将完全投入使用, 工作在满负荷模式, 其灵敏度将提高 10 倍。

引力波信号

相距 3000 km 的两台 LIGO 探测器都观测到了 GW150914, 说明该事件来自于外太空。信号频率从 35 Hz 逐步增加到 250 Hz, 其幅度达到最大值, 随后频率保持不变而幅度衰减——两个密度非常大的物体螺旋式地奔向对方, 最终合二为一。

根据信号频率及其随时间的导数, 可以得到双星系统的总质量, 比两个中子星的质量大多了。一个黑洞和一个中子星的质量够大了, 但这种双星系统的引力波频率要低得多。因此, 只可能是两个黑洞了。

LIGO 团队进行了几个月的艰巨计算, 把观测到的信号与相对论数值模拟方法得到的波形进行比较, 由此确定了两个黑洞在融合前的质量, 融合后的黑洞的质量和自转角动量, 以及黑洞到地球的距离。

广义相对论

LIGO 探测到的 GW150914 并非首次观测到引力波——长期精确地观测脉冲双星体系轨道周期的衰减, 已经定量可信地证明了中子星丢失能量并发射出引力波。

然而, GW150914 是引力波的首次直接测量。此前, 只能在弱引力场极限下对广义相对论进行检验; 今后, 就可以在强引力场和时空曲率快速变化的极限下检验了。

目前, 广义相对论很好地解释了首次观测到的双黑洞融合过程。利用数值模拟方法, 可以确定相关物理参数, 例如以引力波方式辐射

出来的能量。

天体物理学

观测到双黑洞的融合与探测到引力波同样重要。LIGO 的发现表明, 存在着黑洞双星体系, 而且它们在宇宙消亡之前就可以融合。

GW150914 中的黑洞质量非常大, 意味着它们是大质量星体的残骸, 其形成环境中至少有一半以上的原子比氢原子的序数大。假设 GW150914 是有代表性的双黑洞系统, LIGO 团队估计, 在边长为 33 亿光年的立方体空间里, 双黑洞融合的发生几率是每年 2 次到 400 次。

两种天体物理学模型预言了 LIGO 观测到的双黑洞体系的来源。一种认为大质量双星体系演化为黑洞双星, 另一种认为两个单独形成的黑洞靠着引力走到了一起。

双中子星或黑洞—中子星在合体过程中也能产生足够强的引力波。此时, 潮汐力可能会改变中子星的形状, 从而改变轨道周期, 精确测量这些变化, 有助于探测中子星里核物质的刚度。

其他的搜索目标包括高速旋转的中子星(脉冲星)发射的连续引力波、原初宇宙的引力波背景、或其他未知的来源。

引力波探测的未来

通过比较不同地点引力波的到达时间, 可以锁

定引力波的来源位置。

意大利的升级版 Virgo 观测站将在年内投入使用, 日本的神冈引力波观测站正在建设中。它们的干涉臂长度都是 3 km。德国的 GEO600 的干涉臂长度是 600 m, 灵敏度要差一些。LIGO 探测到引力波以后, 印度政府立刻批准建造 LIGO India, 在印度境内建造 Advanced LIGO 观测站。

这些观测站将会构成一个全球网络, 可以更好地定位引力波的来源。到那时, 一旦探测到引力波, 就可以调动传统的天文望远镜立即搜索可能与之伴生的电磁现象。例如, 观测与引力波事件有关的伽马射线暴, 有助于天体物理学家更好地了解两个中子星的融合过程。

GW150914 的发现标志着引力波天体物理学的诞生。现在, LIGO 团队期望每个月都能看到一次事件, 将来甚至能做到每天一次。“我们正在做规划,” Weiss 是这么说的。

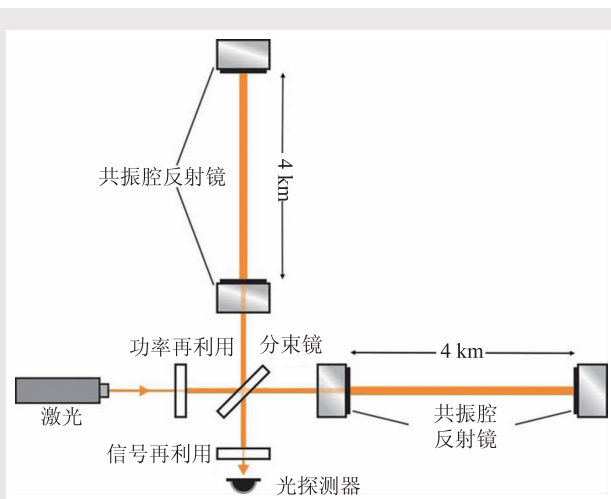


图2 LIGO是经过改造的迈克尔孙干涉仪。每臂配备了相距4 km 的一对反射镜, 它们构成了光学共振腔。LIGO采用了功率再利用技术, 增强了干涉仪的激光功率; 还采用了信号再利用技术, 进一步放大了信号