

·科技纵横·

引力波：一波多折

2016年2月11日，LIGO科学联盟执行主任 David Reitze 宣布：我们已经探测到了引力波，我们终于做到了。发布会其间，美国国家科学基金会（NSF）主任 France Córdova 和会场外经历无数风雨的重要科学家都近乎热泪盈眶。为什么这个发现如此激动人心？除了明显的科学意义以外，更是因为这件事的艰巨程度是前所未有的。不只是参与的科学家，连提供资金支持的 NSF 都是在巨大的压力下，坚持 30 多年才成功探测到引力波。这些都值得我们表达最衷心的感谢。

引力波探测一波多折，首先要从其理论研究说起。爱因斯坦发明广义相对论之后第 2 年就给出了引力波的线性近似解。但是在 20 世纪 30 年代他改变了想法，认为引力波在非线性完整理论下不存在，并撰写文章《引力波存在吗》投到 Physical Review，他和 Rosen 得到的这个结论被审稿人指出是错的，但当时他听不进去，后来他最终发现确实是有问题，把结论又改回来，认为引力波还是存在的。但这并没有对引力波的真实性完全定论。Eddington 在 1922 年就驳斥爱因斯坦最早的文章，称引力波不过是坐标波，没有物理意义。对这个问题的澄清直到 1957 年。那时，Pirani 发现引力波可以以潮汐力的方式影响物体运动（遗憾的是 Pirani 在 2015 年底辞世。另一个差一点赶上 LIGO 结果发布的著名引力波相关学者是最早意识到可以用脉冲星计时探测引力波的 Detweiler，在发布会前几日内逝世。另外还有一位值得提到的先驱是中国中山大学的陈嘉言教授，在 1982 年调试一个早一代的探测器时殉职）。之后 Feynman 又明确指出了这个潮汐力是可以做功的，所以引力波确实是真实物理的。但这并不意味着坐标波不能同时存在。至今，把坐标波从真正的引力

波中剔除出去仍是数值和解析相对论需要处理的问题。

实验方面的波折更多。爱因斯坦曾认为引力波在现实世界中太小，因而不可能被观测到。当然他那时还不知道宇宙里真有黑洞和中子星这样奇妙的东西，所以后来很长时间里没有人去做实验找引力波，尽管这种波是相对论的重要预言。但在 20 世纪 60 年代，Weber 想到了超新星暴发可能产生出足以被观测到的引力波，还造了 2 个谐振金属柱来探测它，在 1969 年，Weber 宣称找到了引力波，但没有人能重复他的结果，他的实验精度也确实不够，所以被普遍认为是个错误结论。尽管如此，Weber 作为先驱者的贡献仍是不可磨灭的，在引力波发现的新闻发布会上他的工作被多次提到，他的遗孀也被 LIGO 邀请到现场。但错误探测这件事本身对引力波探测有不太好的影响，很多人认为从事这项研究的学者可能不太严谨，因此 LIGO 特别小心，在进行观测之后没有立即公布原始数据（按照 NSF 的要求，原始数据最终将在严格分析后公布），以防不严肃的跟风者们随意宣布数据里有信号，从而影响人们对引力波探测的信任。LIGO 的这一防范并非毫无依据，2014 年 BICEP2 宣布探测到了疑似初始引力波的结果，尽管在发布会上 BICEP2 强调了他们得到的只是初始结果，还需要进一步分析验证，但这个结果太重要，被媒体迅速宣传放大，当最终探测结果被证明是星际尘埃造成的假信号时，该实验的可信度遭到重大打击。但需强调的是，BICEP 项目的科学家并没有气馁，BICEP2 现在已经升级为 BICEP3，强化了对星际尘埃的甄别能力。期待在不久的将来，我们能够听到 BICEP 及其兄弟项目的喜讯。

现在再回到 LIGO。有了这么多前车之鉴，LIGO 的程序十分严谨。例如

这次探测在最终分析全面完成以及结果确信无疑之前，整个近 1000 人的 LIGO 科学联盟被要求严格守密。当然如此重大的事件完全不被外界知晓并不可能，引力学界里 LIGO 之外知道此事的科学家还是有的，但绝大多数学者并没有向媒体透露。这证明 LIGO 的媒体策略相当成功，而成功的原因有一部分要归功于 LIGO 做过的演习。为了验证整个系统流程的可靠性、流畅性、严谨性等，在以前的探测中 LIGO 会在只有极少数几个成员知情的情况下向仪器中注入模拟信号，其余整个团队以真正发现为假设夜以继日地工作几个月，直到文章投稿前的一刻，一个信封才被打开，告诉大家这是不是人为注入的模拟信号。有过以前的经验，LIGO 才得以在这次的真正探测中毫不手忙脚乱。另一件能体现 LIGO 谨慎的事情是在最终分析完成之后，LIGO 并没有急于发布，而是规规矩矩地按程序走完了 Physical Review Letters 的审稿过程，期间还应审稿人要求修改过一次稿件。在文章已刊登时，LIGO 才发布新闻。整个过程体现了严谨的态度，学习借鉴意义巨大。

有人这时可能会问，LIGO 如此谨慎为什么在新闻发布会上要把话说死，直接宣布探测成功而不是疑似成功呢？他们不怕重蹈 BICEP2 的覆辙吗？当然信心的背后是几千人几十年、特别是包括最后 5 个月所付出的汗水，但 LIGO 这个实验本身也有一些优点是其他实验所不具备的。

例如，探测初始引力波是通过电磁辐射作为中介，但这个电磁辐射需要穿过广阔的空间才能被看到，而这中间发生了什么无法控制，也很难监测。但 LIGO 探测的引力波是与人类专门制造的探测仪器本身直接作用的。我们很清楚这些仪器的特性和对引力波的反

应,更可以针对所有想得到的干扰因素安装监测设备。其实LIGO中绝大多数的数据通道都是给这些环境监测设备用的,而LIGO又有2个在空间上分得很开的探测器。如果2个探测器看到同一个信号,马上就可以排除探测器周边环境因素造成假信号的可能,因为相隔几千里的2个探测器的高频环境噪声基本是不相关的。事实上,通过以往没有信号时的噪声处理,科学家可以估计出现误报的几率大概是 10^{-7} 。最后,LIGO看到的并不只是合并形成62个太阳质量黑洞的那一个最强信号,还有

弱一些的其他信号在那之后被探测到。这个结果是符合统计规律的。

所以LIGO探测到的信号的可信度非常高,这个结果来之不易。LIGO是NSF支持过的最大项目,但在第一阶段建成后10多年并没有获得成功的观测,一度被讽为人类历史上没有取得任何正面成果的最昂贵科学项目。尽管如此,NSF仍然力排众议提供超过两亿美元对其进行升级,从而最终修成正果。NSF的前瞻眼界和勇气至关重要,所以LIGO将新闻发布会选在NSF附近的华盛顿特区,请NSF主持。另一个给

予过LIGO很大支持的是《Physical Review Letters》(PRL)期刊。在引力波仍是一个很偏的冷门时,为LIGO提供了宣传讲解的平台。这在一定程度上也是LIGO选择在PRL上发表其成果的原因。

总而言之,慧眼的伯乐相中了一匹百折不挠、执着向前的千里马,最终造就了一个伟大的发现。只有在认识到伟大发现背后的艰辛历程后,我们才真正意识到戴在LIGO头上的桂冠有多么耀眼,才能做好在类似科学征途上承受荆棘刺痛的心理准备。

文/张帆,杨桓



张帆,北京师范大学天文系副教授,西弗吉尼亚大学物理和天文系兼职助理教授,研究方向为数值和解析相对论、高能天体物理,包括对引力波及其伴生电磁波波源的分析。电子信箱:fnzhang@bnu.edu.cn。

北京师范大学引力波和宇宙学实验室是北京师范大学天文系在广泛与世界多个引力波核心研究机构建立合作研究和人员交流的基础上整合资源建立的,在天体引力波背景、引力波宇宙学应用、引力波的引力透镜效应、引力波激光干涉仪光声参量不稳定性的观察模拟及控制方法等多方面开展研究。



杨桓,加拿大前沿理论物理研究所,滑铁卢大学量子计算中心博士后研究员,研究方向为引力波天文学、引力波探测器的量子及热噪声分析、量子极限测量。

加拿大前沿理论物理研究所在LIGO数据分析,双中子星引力波,黑洞湍流现象,引力波及其伴生电磁波的机理研究方面均有重要进展。

(责任编辑 王媛媛)