

—“波”发现

(北京大学科维理天文与天体物理研究所 邵立晶 编译自 James Hough. *Physics World*, 2018, (10): 64)

James Hough 教授娓娓讲述了过去 30 年从建造引力波探测器原型到革命性地发现引力波的故事。

1989 年初，我在《物理世界》里写道：“引力波会被探测到，那时它将打开一个全新的天文学窗口。”在刚过去的 3 年里，我们共探测到了 6 例引力波。我很高兴地看到，文章中的很多预言都变成了现实。

在约一个世纪以前，爱因斯坦在广义相对论中预言了引力波的存在。2015 年 9 月 14 日，美国的激光干涉仪引力波天文台(LIGO)首次探测到了来自双黑洞合并的引力波。自那以后，又有 4 例双黑洞合并被探测到。尽管第一个探测让我们很惊讶，但这也是众所期待的。而意料之外的是，这个探测第一次直接证明了几十个太阳质量的双黑洞系统是存在的。

同样让人激动的是，现在又探测到了双中子星合并产生的引力波和伽玛射线。这个探测发生在 2017

年 8 月，是由意大利刚完成升级的室女座引力波探测器(Virgo)和 LIGO 一同发现的。这个神奇的双致密星合并除了被引力波探测器捕获外，还有全球 70 多个望远镜和阵列也观测到了相伴随的电磁辐射。这些电磁辐射与千新星成协，这可能是我们宇宙中绝大部分重元素(如金、铂等)合成的场所。在 Virgo 刚加入后就观测到这样的源，我们这些一直满怀期待的人感到非常惊喜。

往事回首

那么，30 年来，我们是如何走到这一步的呢？这真是个崎岖又令人着迷的故事。

20 世纪 80 年代，几个课题研究组正在发展引力波干涉仪的原型，包括德国的加兴、苏格兰的格拉斯哥、美国的加利福尼亚理工学院(Caltech)和麻省理工学院(MIT)。接下来的 10 年里，如果能够把探测器依比例扩大，它的灵敏度就有可能探测到双致密星合并的信号。虽然改善探测器的灵敏度是件艰难的事情，但我清楚记得，各个研究组之间的激励竞争推进了研究进度。

在迈克耳孙干涉仪中，两个互成直角的臂末端挂上像单摆一样的大镜子，激光被分成两束分别在两个臂中运行。我们测量的是激光从末端镜子反射回来以后的相位差，从中可以得到两个臂的长度差。当一个特定极化的引力波从垂直于探测器方向过来，一条臂会伸长，而另一条会缩短。由于引力波会引起

时空的张力，所以长的臂能够产生更大的变化，正因如此，把臂加长将增加灵敏度。另外，在每个臂中都形成一个法布里—珀罗位型的共振光学腔，相当于人为地增加了臂长。

1983 年初，美国的 Rainer Weiss、Kip Thorne、Ronald Drever 发表了一项关于长基线探测器的研究。其后，德国和意大利从 1985 年开始也进入了这方面的研究。一年以后，英国计划在苏格兰建探测器。到 1989 年的时候，探测器原型的灵敏度持续改善，各方面的进度令人振奋。德国和英国的基金会鼓励研究组之间要停止竞争、一起合作提出一个在德国或苏格兰建探测器的计划。

基于探测器原型的研究，美国的 Caltech 和 MIT 向美国国家科学基金会提交了建造 LIGO 的申请书。申请书要求建造 3 个长基线探测器，包括两个臂为 4 km 和一个臂为 2 km 的干涉仪。其中，一个 4 km 和一个 2 km 的探测器共用一个真空管道，后来它建在华盛顿州的汉福德；另一个 4 km 的探测器有独立的真空管道，后来建在路易斯安那州的利文斯顿。

艰难进展

德国和英国的政策制定者也在认真地考虑对这类项目的支持。英国的科学与工程研究理事会甚至考虑直接资助初步的工程构建。但在 1990 年，两件大事使得在苏格兰失去了建造探测器的机会。首先，理

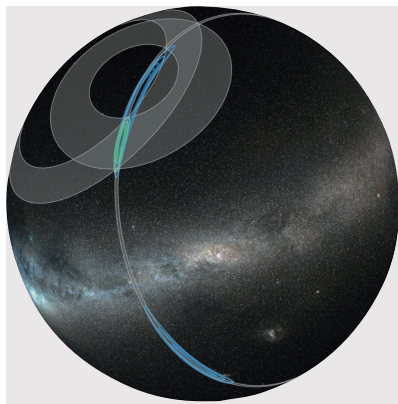


图1 定位双中子星合并引力波源的位置：蓝色是汉福德—利文斯顿的快速定位结果；绿色是最终的汉福德—利文斯顿—Virgo 定位结果；灰色的环是分别来自 3 个探测器的定位

事会任命了一位新的主席，他并不支持引力波研究。他在理事会的财务中找到了一个“黑洞”，这意味着英国不会对长基线探测器进行任何资助。其次，东德、西德进行了合并。东德在科学基础设施和相关投资方面远远落后于西德。为了在东德重新开展科学研究，科学基金的资助重点移到了在东德建造新的研究所以及吸引科研上面。

这对我我和我的苏格兰同事们是个很大的打击。我们努力争取在苏格兰东海岸的卢赫斯一个叫做坦斯莫尔森林的地方，也就是之前皇家空军基地的附近，取得建探测器的许可。但当地人非常反对，因为很多人以为要建立秘密的武器设施；也有人认为激光会伤害到野生动物。我们想要说服当局这些担心是多余的。这事很有趣，但也很有挑战性。可惜最后，我们什么也没得到。

美国同事也不是一帆风顺。项目管理的内部困难引起了很大的问题。无论如何，到1994年，问题都解决了。很幸运的是，英国的科研资助出现了变化。英国成立了粒子物理和天文学研究理事会，引力波再次成为了考虑资助的项目。德国的情况也有了改善。在Karsten Danzmann领导下，一个德英合作的项目，叫做“GEO 600”，开始在汉诺威附近的卢斯施工建造。

焕然一新

美国LIGO的臂长4 km，而意大利Virgo的臂长3 km。由于经费和探测器场所的限制，德英合作的GEO臂只有600 m。这意味着GEO如果想跟LIGO和Virgo竞争，是非常具有挑战性的。为了克服困难，我们在GEO中加入了全新的元素：我们使用了信号回收的机制，它能够在观测频段内加强可调的信号；在悬挂二氧化硅镜子上，GEO使用

了熔凝的二氧化硅纤维来取代传统的金属线，这样使得热噪声大大减小，特别在低频段有很大的改进；另外，我们使用了更先进的激光技术。

LIGO和GEO都预计在2001年初运行。对GEO的人来说，因为存在一些探测器方面“技术上的困难”，我们又激动又紧张，大家的荣耀处于成败关头。当时看起来LIGO要能更早开始观测，但美国的地震损坏了LIGO的一个探测器，这使得GEO赶上了进度。不久以后，LIGO和GEO开始了观测，一直到2010年。期间，2003年Virgo也加入了。就像大家所知道的，那段观测期间我们并没有测到任何引力波信号。这并不是意料之外的事情。原初的申请书中就承认，我们需要加强探测器的灵敏度，才有可能成功测到引力波。

LIGO决定要使用在GEO上试验过的先进技术进行升级。这就塑造了现在的LIGO，叫做“高新LIGO”(aLIGO)：美国发展了更精密的地震噪声主动分离系统；熔凝的二氧化硅纤维悬挂镜子的系统由英国提供；激光由德国生产；一部分的光学器件由澳大利亚承担。

两个臂长4 km、在汉福德和利文斯顿的aLIGO于2015年9月开始运行。当探测器仍在校准阶段的时候，我们革命性地测到了第一个引力波事例。首例引力波的探测多亏了新的地震噪声隔离系统和悬挂系统的低热噪声。升级后的Virgo于2017年8月开始运行，正好及时地加入了双中子星合并事件的定位，使得我们能够确定双中子星合并事件是与短伽玛暴成协的。

展望未来

在未来的几年内，LIGO和Virgo会进一步地改进以持续改善灵敏度。另外，日本神冈矿山的一个新

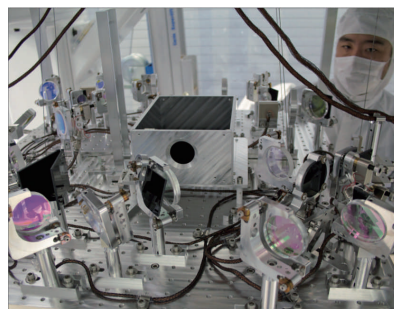


图2 2014年做探测器升级的时候，LIGO工程师正在研究悬挂系统的传输监视器。这将用于激光进出末端的测试质量时的转播

的探测器KAGRA预期将于2019年加入引力波探测网。印度也将建造一个类似于aLIGO的探测器。我们正在见证一个观测天文学的全新时代。引力波多信使天文学打开了全新的窗口，有巨大的潜力来回答我们的宇宙是如何形成和演化之类的问题。

还有更多的科学发现等待着我们。我们将把探测器送入太空：美国航天局和欧洲空间局预计将在2035年合作发射太空激光干涉仪(LISA)。LISA将由3个无拖曳的飞船组成，每个飞船带有一个镜子作为试验质量，放在臂长为250万千米的等边三角形顶点的日心轨道上。

臂长的相对长度将由激光干涉仪来监测。LISA把观测频段降低到亚毫赫兹，这是地面探测器所无法探测的频率。它将研究在合并的星系中超大质量双黑洞的相互作用，也将研究并合系统在进入地面的高频探测前尚在低频的行为。

臂长更长、灵敏度更高的第三代地面引力波探测器也被提出，如欧洲的爱因斯坦望远镜和美国的宇宙探测器。它们同LISA一起，将会探测到宇宙中绝大部分的引力波。

过去的30年使我们进入了一个不寻常的、突破性的天文学时代。我相信，接下来的30年我们会有一大堆的新发现，甚至有不少惊喜。