

在引力波探测器中使用更强的量子压缩

(中国科学院理化技术研究所 戴 闻 摘译自 Philip Ball. *Physics*, December 5, 2019)

安装在现行引力波探测器中的新硬件，使用量子效应来提高灵敏度，并将事件检出率提高50%。

自2015年以来，引力波探测，在美国的两台先进LIGO和意大利Virgo探测器中，已成为常态工作，为天文学打开了一扇新的视窗。现在，LIGO和Virgo的合作团队已分别发表论文展示他们对探测器的改进成果：使用量子物理，抑制信号中的随机噪声。该方案提高了探测器的灵敏度，将使预期的事件检出率提高20%至50%。

先进LIGO和Virgo使用激光干涉，两光束分别沿两个垂直臂(臂长3—4 km)在臂端的镜间来回反射，由此探测，经过的引力波所引起的时空涟漪。探测器的灵敏度——它与 10^{-20} m的空间畸变相当——受到光子中所谓量子噪声效应的限制。光束中的每一个光子都经历量子涨落，这会影响到它沿着长臂往返到达的时间。Maggie Tse，在LIGO工作的一位MIT的研究生说：“光子平均而言会‘准时’到达探测器，但有的很早，有的很晚，形成了一条钟形曲线。如果某一引力波

改变了光子在一个长臂的旅行时间，超过这个钟形曲线的自变量宽度，则该引力波被探测器感知。

LIGO和Virgo团队已经使用量子压缩来减少这种噪音——这是约40年前量子物理学家Carlton Caves首次提出的想法。量子压缩使光子到达时间的钟形曲线变窄，从而使光子涨落掩盖较少的引力波信号。先前的一些原型演示表明，压缩可以降低引力波探测器中的噪声，并且它已经在德国阿尔伯特·爱因斯坦研究所(AEI)操作的探测器上使用了几年。

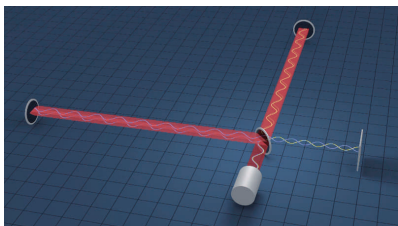
为了在先进LIGO和Virgo计划中实现压缩，团队从早期的实验中吸取了以往的一些经验。在这两个探测器中，压缩器的核心是一个光学参数振荡器。这个装置产生一对对纠缠在一起的光子，于是当一个光子是“提前”一定时间量，另一个则是“滞后”几乎相同的时间量。这些相关联的光子被注入到主激光束的路径中，然后汇合的光被一分为二，每一束由此产生的光沿着设备的一条臂传输。一旦以这种方式制备，两臂中的光束是相关的，并且它们的噪声减少。

一个挑战是：压缩不是免费午餐。由于海森堡不确定性原理，“当我们压缩光子到达要求的时间分布宽度时，相应的其他参数肯定变得越来越不确定，”Tse说。在这种情况下，在给定时间撞击反射镜的光子数变得更加随机，导致所谓的量

子辐射压力噪声增加。这种权衡选择是值得的，因为辐射压力效应只有在低频时才是明显的(高频不受影响)。尽管如此，这另一个噪声来源也可以限制仪器的灵敏度，这就是为什么LIGO研究人员现在正在建造一个低频滤波器，预计在未来几年内安装在LIGO站点。也有计划对Virgo进行类似的改造。

目前，在2019年4月开始的第三次观测阶段，压缩大大提高了仪器的灵敏度。来自MIT的LIGO团队成员Lisa Barsotti说：“对于平均二元中子星系统，我们现在可以探测到的距离增加了15%”。这意味着“我们期望探测到的引力波波源的数量增加大约50%”。与此同时，对先进Virgo探测器来说，探测范围增加比LIGO少一点：二元中子星的可探测距离增加约5—8%，使探测引力波波源的数量提高16—26%。此外，压缩特别提高了仪器对高频引力波的灵敏度，这应该有助于确定波源在天空中的位置。这种定向信息允许天文学家进行后续观测，在这些观测中，他们从产生引力波的事件中寻找电磁信号。

有专家评论说，这些结果代表了引力波探测器的一个新时代。这样的量子工程现在已经从理论上的改进转变为一种工具，可以探测宇宙中比以往任何时候都要远的黑洞并合。这两个研究团队所做的改进，使我们能够看到来自全新类型源的引力波信号，例如超新星或在二元中子星碰撞中产生的残余恒星。



相互垂直的长激光臂(长度为3—4 km)。将来自主激光器(底部圆柱体)的光束劈裂到两个相互垂直的臂，臂两端都有反射镜。来自两臂的光在探测器(右侧)重新组合，产生干涉图样