

打压替代引力

(北京大学 徐仁新 编译自 Fabian Schmidt. *Physics*, December 18, 2017)

众所周知，爱因斯坦广义相对论描述万有引力，但一些试图替代相对论的引力理论也声称其合理性。不过，依据中子星并合时发出的引力波和电磁波观测，理论家们最近严格约束了这些替代引力。

广义相对论(简称GR)非常成功地描述万有引力，覆盖行星、恒星、黑洞、星系等若干层次。GR预言宇宙的膨胀，但也有个短板：如何解释宇宙的加速膨胀。鉴于所有辐射、可见物质和暗物质等都施加向内“拽”的力，宇宙理应收缩。为了解释加速膨胀，物理学家不得不考虑三种可能(一般统称“暗能量”)。第一种也是最简单且受青睐的，认为非零的宇宙学常数或真空能(相当于提供负压强)有效地抵抗引力。第二种推测宇宙学常数随时间演变。第三种认为大尺度上引力的表现偏离GR。针对第三种可能性，根据双中子星并合时引力波和光波的观测，最近有四个研究小组作出最严格的限制。

双中子星并合引力波事件GW170817¹⁾开启了多信使天文学的新时代。LIGO/Virgo记录引力波后

不到两秒，费米卫星就在同一天区探测到短伽马射线暴。全球望远镜的后续观测证实引力波和伽马射线暴都起源星系NGC 4993(距离约1.3亿光年)内一对中子星的并合。这两种辐射传播如此远距离后相隔几秒钟到达地球，意味着它们的传播速度差在 10^{-15} 之内。以前观测上限制引力波和光波的速度差在五分之二的水平，所以这次改进了14个数量级。

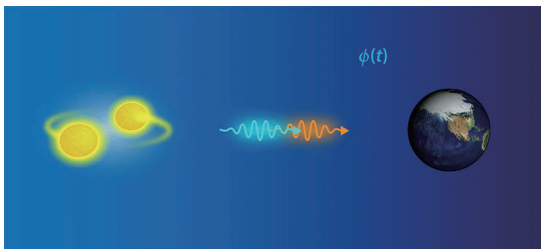
GW170817是如何严格检验替代引力理论的呢？GR是最简单的，仅涉及一种动力场，其零质量激发就是以光速传播的引力波。超出GR的理论往往通过引入新的动力学场来实现。简单而常用的方式是引入时空依赖的标量场 ϕ ，并跟引力场耦合。它们一般基于Horndeski理论的拓展。这类理论可允许引力波与标量场“混合”，从而改变引力波的传播速度。简而言之，引力波好似在特殊“介质”中传播(见图)。

为了解释宇宙的加速膨胀，要求存在非零、时间依赖的标量场 $\phi(t)$ 。假设该标量场在百亿年的哈勃时标上演化，这将导致10%以上引力波速度的改变。在此框架内，四个研究小组根据几乎相同的引力波和电磁波速度排除了若干这类引力理论。

特别地，这些论文严格地约束了所谓的协变伽利略模型。该模型有4个自由参数，不需要借助宇宙学常数来解释加速膨胀。但是，将模型跟GW170817观测对比，三个研究组均发现其中两个参数几乎为零。他们的结果无疑敲响了协变伽利略的丧钟。尽管还可以通过调节另外两个参数以得到加速膨胀的宇宙，但这两个参数值跟一些其他宇宙学观测结果不吻合(如星系分布和宇宙微波背景之间的相关性)。事实上，另一个组也利用GW170817和其他天文观测排除了协变伽利略的某个子类。

此外，Baker等发现GW170817也严格约束了矢量场跟引力场耦合的暗能量模型。同样，也有人利用GW170817否定了一些“仿真暗物质”模型(认为不存在暗物质但也试图解释星系和其他天体的动力学行为)。有趣的是，GW170817为暗物质影响引力波提供了独立的确凿证据：暗物质引力导致的透镜效应使得中子星并合发出的光信号推迟几年到达地球，而观测表明引力波必须经历相同的延迟！

总之，GW170817深化了我们对暗能量的认识，排除了涉及引力场和标量场耦合的相当一部分参数空间。引力波窗口只是开了一半，未来可望探测到更多的事件，从而让我们深入理解万有引力和宇宙加速膨胀的本质。



最近观测到的1.3亿光年外双中子星的并合过程，发现引力波和光波相差2秒内到达，表明这两种本质不同的波传播速度差不超过 10^{-15} 倍光速。这一发现严格限制了一些替代引力理论(它们为解释宇宙的加速膨胀而引入引力场跟时间依赖标量场 $\phi(t)$ 之间的耦合)。这些理论要求引力波(橙色)的传播速度跟光波(浅蓝色)显著不同

1) 参见《物理》2017年第11期文章“天文学家目击中子星相撞”。