

爱因斯坦的引力理论是否符合最新的LIGO/VIRGO/KAGRA观测？

引言

引力波携带了源的信息，是由质量做非均匀加速产生的，通常被认为是弯曲时空中的涟漪。[爱因斯坦的广义相对论](#)（GR）预言了引力波的性质。根据GR，引力波以[光速](#)传播，并且传播速度不依赖于波的频率。它也预测了引力波具有两个独立的[偏振模式](#)，称为“加”模式和“叉”模式。不仅如此，GR还对导致引力波产生的时空动力学行为做出了预测。由高新 LIGO/Virgo 探测器网络探测到的双星并合事件包括黑洞和中子星的并合。这些事件为验证GR的预测、寻找超越GR的物理提供了难得的机会。

在最新的引力波星表GWTC-3中，LIGO/Virgo探测器已探测到约90个引力波事件，包括双黑洞并合、双中子星并合以及中子星-黑洞并合。在这90个事件中，[首次报告](#)了来自第三次观测运行的后半部分（O3b）的35个致密双星并合的事件。在[本文](#)中，我们将新的观测数据与旧数据结合起来寻找可能存在的与GR的偏离。

每个实验都会在噪声存在的情况下进行测量，引力波探测器也不例外。当我们搜寻与GR的偏离时，探测器中存在的某些类型的噪声与信号类似，很可能导致我们在没有任何偏离的时候错误地声称存在偏离。因此，在O3b的数据中，我们仅分析15个“响亮”的信号。这些信号与噪声相似的几率是在1000年甚至更长的时间里才有可能发生1次。我们采用了9种不同的检验来寻找与GR的偏离，结果总结如下。

一致性检验

信号与数据的整体一致性：残差检验

我们使用GR波形来探测和解释引力波事件。我们能做的最直接的GR检验是从观测数据中减去与数据最匹配的GR波形。如果GR是正确的，则此过程留下的残差应该与噪声一致。对于所有研究的事件，我们发现残差与探测器噪声一致，为数据与GR预言的一致性提供了证据。

波形的自洽性：旋近-并合-铃宕一致性检验

由中子星或黑洞并合产生的引力波具有三个演化阶段：两个天体缓慢旋近，两个天体并合为一个天体，以及并合后致密天体的铃宕。一个重要的一致性检验是研究旋近的波形和旋近后的波形是否自洽。利用双星系统在GR数值相对论模拟启发下给出的经验拟合，并合后黑洞的质量和自旋都可以从演化的旋近部分和旋近后部分分别推断出来。我们发现，对于所有分析的事件，旋近和旋近后的参数都非常吻合（见图2）。

GR的参数化检验

在双星演化后期的动力学中，高度非线性和复杂的物理学会引发各种物理效应。这些效应被编码在引力波波形中。一个修改引力理论可能对这些效应中的一个或多个有不同的预测。参数化模型能让我们在这些物理效应中寻找与GR可能的偏离。因此，我们在演化的旋近和并合/铃宕阶段寻找超出GR的证据。

利用旋近检验

双星的旋近阶段由慢速、弱场近似来描述，称为GR的[后牛顿近似](#)。不同的后牛顿参数蕴含了双星演化动力学中的一个或多个物理效应。检验这些参数与GR预测的一致性检验GR的一个非常有效的方法。我们的分析与之前的引力波星表相结合，提供了后牛顿参数偏离GR的最新限制。在统计学意义上我们没有发现与GR的不一致。

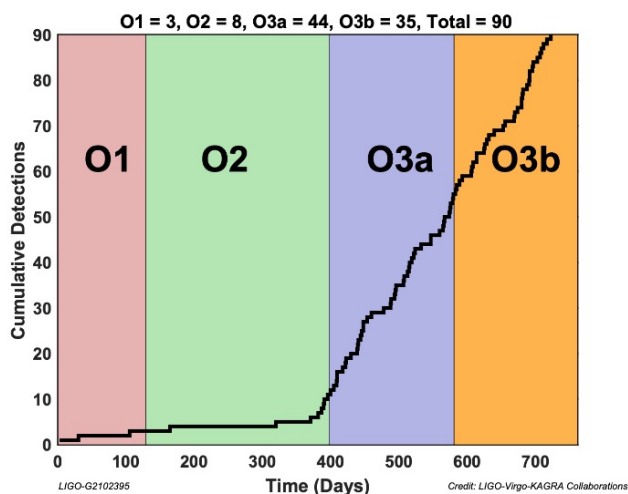


图 1: 升级的LIGO和Virgo探测器前三次观测运行的持续时间和累积探测的次数。正如正文中提到的，并非所有这些双星并合事件都被拿来作GR的检验。

利用双星的旋近信号，我们也能够检验引力波信号是否与GR中两个克尔黑洞的并合一致。如果其中一个致密天体在自转，这种自转会导致变形—就像地球自转导致两极变扁和赤道膨胀一样。这会对双星旋近引力波的相位演化产生明显的贡献。与克尔黑洞相比，其他致密天体的相位演化是不同的。我们检验了这种效应，但没有发现任何**奇异致密物体**存在的证据。

利用并合和铃宕检验

用类似的方式，我们检验并合和铃宕阶段的引力波信号是否符合GR的预测。除了大质量双星外，并合和铃宕的持续时间比旋近短得多，导致在这部分演化过程中**信噪比**的积累比较少。仅考虑在并合和铃宕期间积累了可观信噪比的事件能让我们给出有意义的限制。这种检验采用了三种方法，它们在波形细节、方法论和参数化方面相互补充。在测量不确定性内，我们发现结果与GR一致。

对引力波传播的检验

虽然在GR中引力波以非色散的方式传播，但是对GR的修正会导致**色散**。不同频率的引力波以不同的速度传播，从而导致它们到达探测器的时间不同。例如，如果并合过程中发出的高频波比旋近过程中的低频波传播得更快，那么“并合波”会比预期更早到达地球。我们寻找引力

波色散但没找到任何证据。一个可被限制的具体又有趣的模型是重引力子理论。这类理论假定引力子具有微小的（但未知）质量，会导致一种特定类型的色散。这种色散可被限制从而给出引力子质量的上限。根据所有三个观测运行阶段分析的事件，我们得到的限制是引力子的质量应该低于 $1.3 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ 。

对引力波偏振的检验

GR中的引力波只有两种偏振模式：加模式和叉模式。然而，更一般的引力理论最多可以有六种不同的偏振模式（见图3）。使用三个探测器（LIGO的两个和Virgo），我们可以对信号中非GR的偏振含量给出部分限制。这种方法依赖于构建没有任何GR引力波信号的探测器数据流。该数据流中任何残留的成分都表明存在额外的偏振模式。我们的分析表明不存在这种情况并且数据符合GR的预测。

并合后的引力波回声

黑洞的理论替代物被称为黑洞模仿者，因为它们可以模仿黑洞的特性但不是GR中的黑洞。黑洞最显著的特性之一是存在**事件视界**。这是一个没有任何东西能够逃出的表面，它具有完美的吸收性。然而，在黑洞模仿者中，事件视界的替代物可能是一个部分或完全反射的表面。有人认为，来自此类物体并合的波形可能具有铃宕信号的重复回声。我们在数据中搜索了这样的回声但并没有发现。这意味着并合后的物体与GR中的旋转黑洞的一致性。

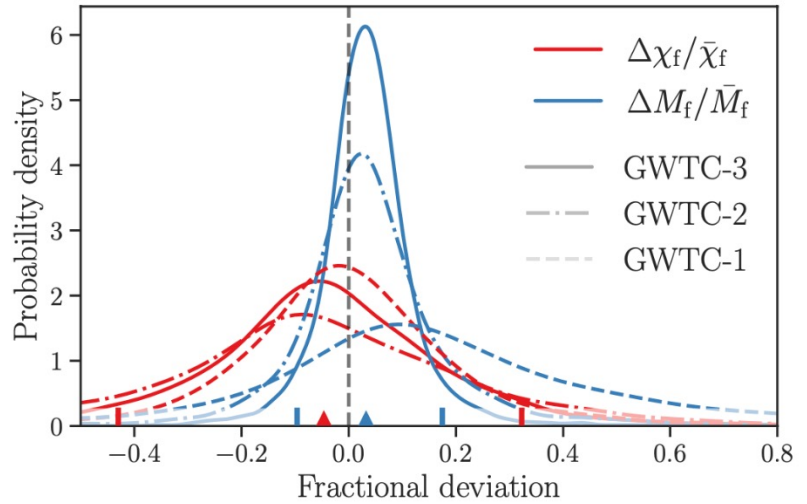


图 2: 对GWTC-3引力波波形的旋近部分和旋近后部分推断出的质量（蓝色）和自旋（红色）的分数差异与先前分析（GWTC-1 和 GWTC-2）的结果的比较。灰色竖线表示GR值为0。结果与GR具有极好的一致性。（来自**我们文章**的图4）

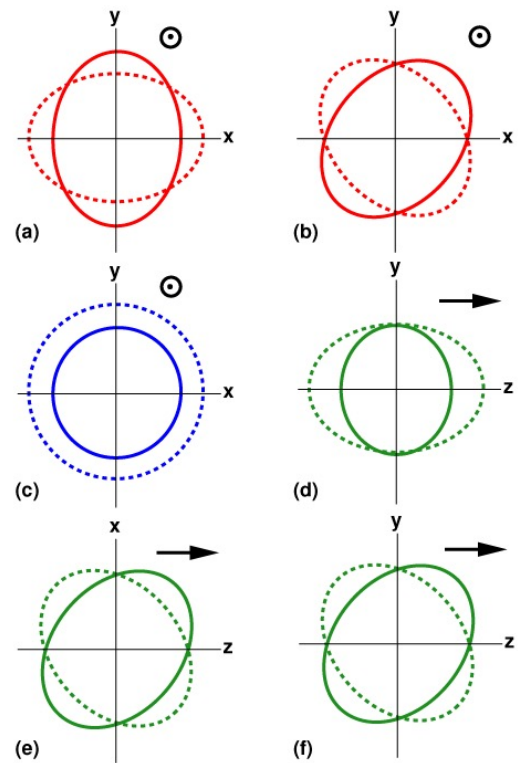


图 3: 在一般的引力理论中允许的六种偏振模式。前三个图中波的传播方向指向屏幕内（横向）。后三个中的箭头表示波的传播方向。在第一行的两个是在GR中允许出现的“+”模式和“x”模式（图片版权：Clifford Will, Living Reviews in Relativity）

总结

我们用9种不同的方式搜寻了GR可能失效的证据。我们发现，在考虑了噪声引起的统计不确定性和波形模板不够准确导致的系统误差后，GR的预测与探测的事件完全一致。鉴于检验探测事件中GR可能失效的重要性，我们将在未来几年持续推动这些检验。利用未来几年投入使用的更灵敏的探测器，新的检验可以帮助我们探索迄今还未涉足的关于引力的诸多方面。

术语表

色散：波的不同频率成分以不同的速度传播。

偏振：波可以振荡的独立方式。对于广义相对论中的引力波，有两种独立的偏振模式，称为加模式和叉模式。这意味着经过的引力波会以“+”和“x”的形式拉伸和挤压一圈粒子。

O3观测运行：高新LIGO和Virgo时代的第三次数据采集，自2019年4月开始。O3的第一部分O3a从2019年4月1日运行到2019年10月1日。而O3的第二部分O3b从2019年11月1日运行至2020年3月27日。

黑洞：引力强到连光都无法逃脱的时空区域。黑洞独有的不可逃逸边界被称为事件视界。

中子星：一颗质量为10到25倍太阳质量的恒星在经历超新星爆炸后的残留物。典型的中子星质量约为1-2个太阳质量，半径为10-15公里，是迄今为止发现的最致密的天体之一。

奇异致密物体：能够模仿黑洞特性的物体，但不是黑洞。将它们与黑洞区分开来是个挑战性的工作。

GR波形：使用广义相对论计算的引力波波形，用于探测和解释数据中的引力波信号。

克尔黑洞：广义相对论中的黑洞，完全由其质量和自旋（旋转）描述。

eV/c²：电子伏特（eV）是能量单位，通过使用著名的爱因斯坦质能方程E=mc²，eV/c²变为质量单位。1eV/c²大约等于1.8 x 10⁻³⁶千克。通过检验给出的引力子质量小于2.3 x 10⁻⁵⁹千克。

了解更多

在[此处](#)或在 [arXiv.org](https://arxiv.org) 上阅读完整科学文章的免费预印本

访问我们的网站：

www.ligo.org; www.virgo-gw.eu; gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



（简体中文翻译：高勇，邵立晶）