

相对论通过LIGO的全面审查

(北京大学 徐仁新 编译自 Frans Pretorius. *Physics*, May 31, 2016)

LIGO探测器记录的引力波信号跟广义相对论的预言毫无偏差。

人类历经50多年的努力，在爱因斯坦广义相对论预言引力波约100年后的2015年9月14日，利用LIGO干涉仪终于首次直接测得引力波。观察到的事件被称为GW150914，源于两个黑洞相撞。它们并合前的质量分别为太阳质量的29倍和36倍，并合的残骸是一个62倍太阳质量的黑洞，并处于所允许的最快自旋的67%。该引力波信号在碰撞前几个周期内统计性显著，而那时广义相对论的高度非线性和强场动力学也突出表现。GW150914是迄今为止了解强引力场的最佳事件。

GW150914能告诉我们的第一件事是：自然是如此地遵循爱因斯坦所描述的黑洞碰撞。LIGO和Virgo两个团队的研究人员进行了一系列的研究，想了解GW150914数据是否隐藏着对广义相对论的任何偏

离。他们首先根据广义相对论模拟，确定拟合观测信号的最佳波形，即“模板”（见图）。他们发现，扣除模板后的数据（即残差信号）跟噪声一致。从某种意义上说，广义相对论的并合预言经受“所有”检验：双黑洞轨道衰减，剧烈碰撞以及异常快速地过渡为一个稳态旋转黑洞，引力波在宇宙中的传播，最终这些波转变成LIGO探测器记录的一声哀鸣。鉴于信噪比高达24，替代模型对GW150914的预测跟广义相对论结果相差最多4%。

除了这一全面检验，LIGO/Virgo团队也用引力波信号校验广义相对论和黑洞物理的某些特征。在这方面，他们比较了波形的早、晚期部分。根据最初旋近产生的引力波，可推断双星的质量和自旋。给定这些数据，亦可依广义相对论计算残留黑洞的质量和自旋。研究人员将算得的结果跟铃宕时期独立测量的质量和自旋进行比较，发现在误差范围内一致。

另一个检验涉及描述旋近阶段的后牛顿(PN)展开项。引力波信号的PN项其实是辐射强度关于 v/c 的多阶展开，其中 v 为双黑洞相对运动速度， c 为光速。脉冲双星的轨道周期因引力波辐射而衰减，因而这一观测可限制PN项，尤其是低阶。但对有关强引力辐射的高阶项而言，

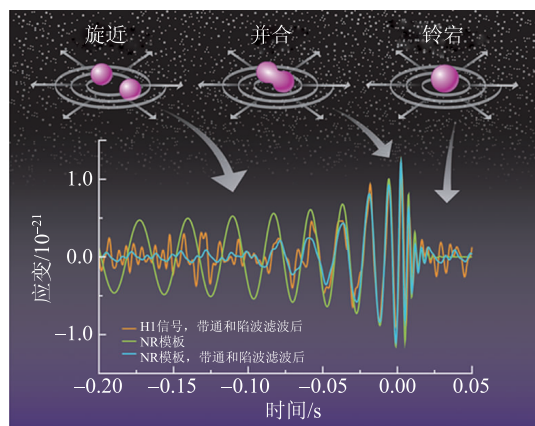
比起脉冲双星，LIGO/Virgo团队能够在几个数量级以上给出更好的限制。

乍一看来，似乎这些新结果只是对广义相对论过去检验的补充。然而，GW150914远非仅限于此。先前的检验表明广义相对论在弱场区有效，而GW150914给出第一个直接的观测证据：广义相对论是描述黑洞视界附近极端时空动力学的正确理论。有人可能会说脉冲双星的观测已经告诉我们引力波的存在，但GW150914引力波比脉冲双星要强24个数量级以上。

天文学家已经发现不少像黑洞的致密天体。最引人注目的一例就是据恒星轨道运动确定的银心四百万倍太阳质量天体，但观测并不能肯定它就是广义相对论所描述的黑洞。GW150914给了我们一些量化证据，表明黑洞丰富的物理恰如广义相对论所预言。例如，LIGO观测结果跟所谓的宇宙监督假设一致，即引力奇点必须隐藏在事件视界内。如果在GW150914激烈碰撞时产生一个“裸”奇点，观测数据会出现异常。

类似GW150914事件的发生率较高，而LIGO灵敏度在达到设计目标之前还会提高三倍。因此我们预期在今后的五年内，会测到几十个类似的事件，信号最强事件的信噪比可达100。人类将有机会更好地洞察极端引力的性质！

更多内容详见：B. P. Abbott et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 221101.



LIGO位于华盛顿州汉福德探测器记录的信号(H1)跟数值相对论(NR)最佳拟合波形的对比。滤波后的NR波形显示原始波形如何被探测器响应，表明仪器对GW150914事件的旋近、并合和铃宕这三个阶段敏感