

GW170817: 爱因斯坦对了吗?

邵立晶[†]

(北京大学科维理天文与天体物理研究所 北京 100871)

2019-06-17 收到

[†] email: lshao@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190904

GW170817: was Einstein right?

SHAO Li-Jing[†]

(Kavli Institute for Astronomy and Astrophysics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 来自双中子星并合的引力波事件 GW170817 和伴随的电磁波段的观测, 是天文学研究上的一个重要突破。它不仅带给人类史无前例的关于中子星、伽马暴、千新星的知识, 也提供了一个检验强场引力的极端天体实验室。爱因斯坦的广义相对论在不同的方面得到了全新的检验, 包括引力的速度、引力子的质量、时空的对称性、引力波的辐射和偏振等。这些检验在更高的精度与更广的视角上肯定了广义相对论的预言。

关键词 双中子星并合, 引力波, 广义相对论

Abstract The discovery of the binary neutron star inspiral GW170817 was one of the most important events in astronomy. It not only brought us unprecedented knowledge about neutron stars, gamma-ray bursts, kilonovae and the astrophysical environment, but also provided a novel testbed for strong-field gravity. Many distinct aspects of Einstein's general relativity have been tested, including the speed of gravity, the mass of the graviton, the symmetry of spacetime, and the radiation and polarization modes of gravitational waves. No deviation from general relativity has been found.

Keywords binary neutron stars, gravitational waves, general relativity

1 广义相对论与引力波探测

1915年11月, 爱因斯坦完成了他的引力场方程, 并向普鲁士科学院做了报告^[1]。这组方程不仅解决了牛顿引力和狭义相对论的矛盾, 更是从根本上改变了人们对引力的理解。广义相对论告诉我们, 引力其实是弯曲时空的一种表现。一年后, 爱因斯坦意识到, 他的广义相对论中存在着波动解, 也就是我们现在所知道的引力波^[2, 3]。

广义相对论的场方程其实是联系时空性质和物质分布的方程。惠勒用很直观的语言解释道: “物质告诉时空怎么弯曲, 反过来, 时空告诉物质怎么运动。”可是, 由于物质与时空之间的相

互作用非常之弱, 其实物质想要弯曲时空是十分不容易的; 也就是说, 时空是非常“硬”的。正是由于这个原因, 想要产生能被探测到的时空“涟漪”——引力波, 需要有非常极端的物理条件。天体物理中的黑洞与中子星等致密天体就为人们提供了这样的引力波源^[4]。

即便如此, 由于黑洞、中子星等致密星并合产生引力波的事件发生在很遥远的宇宙; 等引力波传播到地球的时候, 它的效应就是微乎其微的了。正是因为这样, 爱因斯坦本人对于人类探测引力波的可行性并不乐观。

尽管如此, 美国的激光干涉仪引力波天文台 LIGO 却在广义相对论提出一百周年的时候实现

了引力波的探测^[5, 6]。首例引力波探测GW150914发生在2015年9月14日,探测到的是来自两个大约30倍太阳质量的黑洞的并合。从此,人类打开了一扇全新的观测宇宙的“引力波窗口”。

迄今为止, LIGO/Virgo 合作组已经完成了两轮探测, 分别称为O1、O2。他们共发现了11例引力波事件^[7]。这些事例包括10例双黑洞并合和1例双中子星“旋近”^[8]。因为黑洞时空是广义相对论中的真空解, 除去黑洞的奇点不论, 其实双黑洞并合可以看做是“真空动力学”。但双中子星的引力波事件则不然, 它呈现给人们的是超致密核物质在高度动态的弯曲时空中的动力学。所以, GW170817是研究超核物质状态方程^[9]和引力的绝佳实验室。

2 双中子星“旋近”事件GW170817

GW170817是LIGO/Virgo合作组在2017年8月17日探测到的一个引力波事例^[8]。与来自双黑洞并合的引力波不同, LIGO/Virgo合作组只探测到GW170817的“旋近”(inspiral)部分, 并没有“并合”(merger)和“铃宕”(ringdown)的测量, 见图1。这是因为, 在双致密星并合产生引力波时, 引力波的频率反比于系统的质量。中子星比黑洞轻, 所以并合和铃宕的频率较高, 超出了LIGO/Virgo探测器现在的敏感频率范围。

除引力波探测以外, GW170817在并合后的一系列电磁波段的辐射, 也纷纷被地面和空间的电磁波段的探测器记录到(包括望远镜和卫星等)^[10]。在引力波信号结束的1.7 s后, Fermi和INTEGRAL卫星测到了来自同一片天区的一个短伽

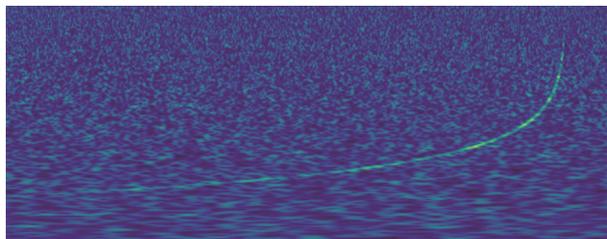


图1 GW170817在LIGO-Livingston探测器上的时间—频率图; 其中横轴为时间, 纵轴为频率^[8]

马暴信号^[11, 12]。11个小时后, Swope望远镜测到了光学对应体, 精确定位了GW170817, 并确定了寄主星系和双中子星并合的距离。多家电磁对应体观测团队也纷纷跟进测量, 并测到了一个逐渐由蓝成分变为红成分的“千新星”(kilonova)信号^[10, 13, 14]。9天后, X射线电磁对应体被测到; 16天后, 射电波段电磁对应体也被测到。中微子的观测也及时跟进, 给出了对应的中微子流量的上限^[10, 15]。

对一个天体物理信号, 这样规模的测量是史无前例的。正是由于这些观测, 开启了天文学的“多信使”时代(multi-messenger era)^[10, 15]。GW170817不仅使人们对双中子星的演化^[16]、伽马射线暴^[12]、千新星^[14]等天体物理过程有了更深入的理解, 也对宇宙学^[17]、引力理论等基本问题有了进一步的认识。

3 爱因斯坦对了吗?

在本节中, 我们将针对用GW170817检验引力理论(特别是广义相对论)做一个简单的讨论。这包括引力子的质量、引力波的速度和时空对称性、引力波的“啁啾”(chirp)、偏振、暗能量和宇宙学、额外维等多个方面。

3.1 引力子的质量

在广义相对论中, 引力由引力子传播, 它是自旋为2的无质量的粒子。根据狭义相对论中的能量动量关系, 我们知道, 质量为 m 的粒子满足 $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ 。那么, 如果引力子质量为零的话, 它的速度就是光速; 质量大于零的话, 速度就小于光速, 且与它的能量有关。简单的计算可以发现, 引力子的能量越大(对于引力波而言, 根据德布罗意关系, 对应于频率越高), 传播速度就越大。

在引力波的产生过程中, 先是产生低频的信号; 随着致密双星通过引力波辐射损失轨道能量、越绕越近, 对应的引力波的频率则是越来越

高。倘若低频的和高频的引力波的速度不一样，那么，经过一段距离的传播，高频的引力波因为速度较大逐渐“赶上”低频的引力波，从而导致引力波的信号形状发生相应的变化^[18]。在引力波的信号处理中，我们可以通过“匹配滤波”(matched filtering)的方法，把信号变形的情况给定量地提取出来^[4]。

通过对GW170817波形信号的分析，LIGO/Virgo 合作组给出了引力子质量的限制 $m < 10^{-21} \text{ eV}/c^2$ ^[19]。这个限制比来自双黑洞并合的引力波的限制要弱，但比来自脉冲双星的限制要强^[20]。

3.2 引力波的速度和时空对称性

上一小节的匹配滤波能够给出不同频率的引力波之间的速度差异，但对于引力波本身的速度是否为光速并无限制。对于GW170817这个事件而言，不仅有引力波的测量，还有电磁对应体的测量；这给我们提供了额外的检验引力的渠道。特别是1.7 s后的短伽马暴GRB170817A的观测，给引力波的绝对速度一个非常强的实验限制^[11]。

倘若假设伽马暴事件GRB170817A产生的时间与双中子星并合GW170817的时间差异不超过10 s，那么，可以给出引力波速度与光速的相对差异不超过 10^{-15} ^[11]。另外，在具有时空洛伦兹对称性破坏的“标准模型拓展”(standard-model extension)框架内^[21]，这个限制可以转换为对模型参数的限制。这样所得到的限制比先来自于宇宙射线^[22]和脉冲双星^[23]的限制有了长足的改进。

GW170817的观测表明，时空结构在很高的精度上满足狭义相对论和广义相对论预言的对称性。

3.3 引力波的“啁啾”

正如前面所说，双中子星并合的过程中，系统辐射引力波、带走轨道能量；这样的话，双中子星就越旋越近，所对应的引力波的频率越来越高(图1)^[24]。这个过程被形象地称为“啁啾”(chirp)。引力波的测量能够非常准确地测量啁啾这个过程中的相位演化，从而探索双星旋近、并合、铃宕过程的动力学。

在旋近这一部分的啁啾，理论上主要用后牛顿(post-Newtonian)近似做计算。在后牛顿近似中，使用 v/c 作为小量进行展开，一阶一阶地计算相应的物理过程。其中，引力波的领头阶辐射是四极矩辐射(quadrupole radiation)，记为0 PN阶；在此基础上，每压低一个 v/c 因子，就多0.5 PN阶。

相比较双黑洞而言，双中子星的质量较小。由于致密双星并合时引力波的频率 $f \propto 1/M$ ，双中子星并合所对应的频率较高。这就相当于在频率域把整个波形往高频率的地方移动。这样的话，在刚进入LIGO/Virgo探测器的敏感频段时(约几十个Hz)，双中子星具有相对来说较小的 v/c ，所以它们是探索较低PN阶的物理的理想实验室。

假设在广义相对论中，这些PN项的大小由 φ_n 刻画。那么，我们如果想要讨论第 n 阶对广义相对论的偏离，就会很自然地把相对偏离记为 $\delta\hat{\varphi}_n$ ，新的项的大小满足 $\varphi_n \rightarrow (1 + \delta\hat{\varphi}_n)\varphi_n$ 。LIGO/

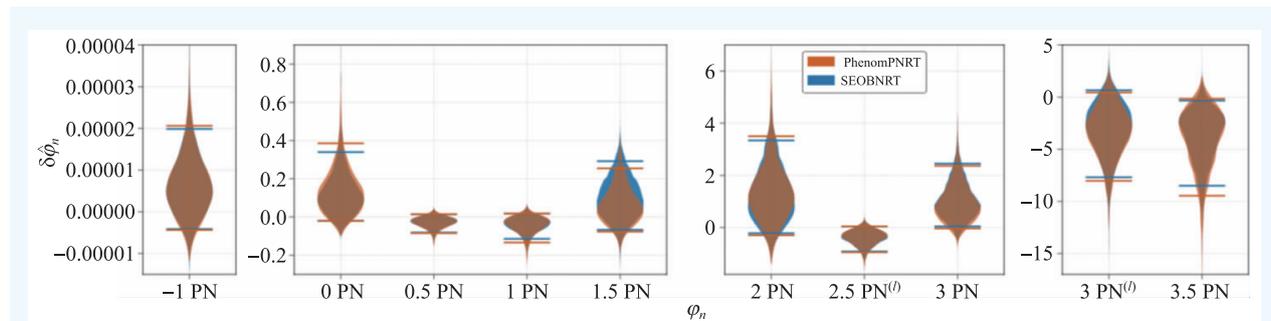


图2 GW170817对啁啾信号的“后牛顿”展开中各个PN阶的限制。图中采用了两种波形做检验(PhenomPNRT; 红色; SEOBNRT^[25]; 蓝色), 并得到了一致的限制结果^[19]

Virgo 在检验啁啾信号的时候，正是采用这样的参数化方式，称为引力波“参数化的检验”^[19]。

图2给出了用GW170817对啁啾信号做参数化检验的结果^[19]。从该图的纵坐标可以看到，在PN阶数较高时(如3 PN、3.5 PN)，GW170817并不能给出非常强的限制。而在PN阶数较低时(如-1 PN、0 PN)，它能给出很强的限制。特别是在-1 PN阶时(也就是相对于四极矩辐射而言，修正因子正比于 $(v/c)^{-2}$ 的项)，GW170817给出了 10^{-5} 量级的限制，这个比来自双黑洞并合的引力波的限制要严格很多。

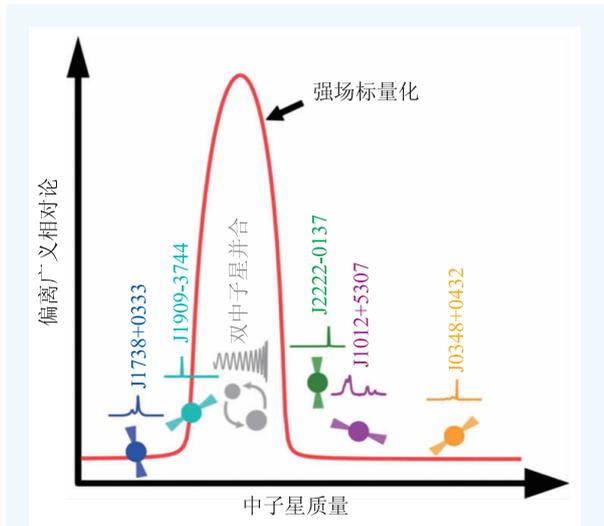


图3 第三代地面引力波探测器有望测到合适的双中子星系统，给出比脉冲双星观测更强的强场引力波偶极辐射的限制^[26]

在理论上，-1 PN阶是个非常重要的项，它刻画了系统的偶极辐射(dipole radiation)。一般来说，破坏强等效原理的引力理论，都会预言类似的项。但迄今为止，限制偶极辐射最好的限制不是来自GW170817，而是来自脉冲双星系统，因为它们具有更大的 $(v/c)^{-2}$ ，并且有更长时间的观测数据^[26]。在第三代地面引力波探测器上，人们有希望发现合适的双中子星系统，它们能够给出比来自脉冲双星的观测更强的限制^[26]，见图3。

3.4 引力波的偏振

在广义相对论中，引力波具有两种张量偏振模式，分别称为“+”(加)模式和“×”(乘)模式。但在非广义相对论的引力理论中，原则上引力波可以有最多至6种偏振模式^[27]，见图4。

如果想要检验探测到的引力波是哪 N 种偏振模式的混合，一般来说就需要至少有 N 个独立的引力波探测器。对于GW170817来说，它有来自LIGO两台探测器和Virgo一台探测器的测量。所以，它可以用来检验引力波的偏振成分。GW170817另外很有利的一点是，它有光学观测的精确定位，这个观测对于偏振模式的测量非常有帮助。详细的分析表明，GW170817对于超出广义相对论的偏振模式的限制^[19]远远优于来自其他的引力波事件的限制。

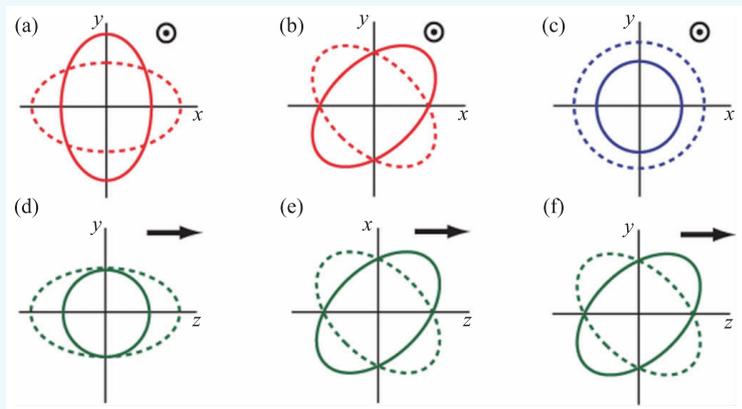


图4 引力波的6种极化模式。其中(a)和(b)分别是“+”模式和“×”模式；(c)和(d)是两种标量模式；(e)和(f)是两种向量模式^[27]

3.5 暗能量和宇宙学

GW170817也可以用来检验宇宙学模型，特别是给出一个关于哈勃常数的独立测量^[17, 28]。这里，我们简单讨论一下，引力波速度的测量对于研究宇宙学的引力理论的限制^[11]。我们会发现，GW170817和GRB 170817A的测量在很大程度上限制了跟宇宙学相关的引力理论参数空间，对于进一步理解暗能量起着重要的作用。

现在的标准宇宙学模型包括约

5%的正常物质和约95%的未知物质；其中约25%称为“暗物质”，约70%称为“暗能量”。暗能量由于具有等效的负的压强，会加速宇宙的膨胀。从场论的观点看，我们对暗能量究竟由何种场造成仍旧是知之甚少。现代宇宙学相关的研究中，一般会假设一种额外的标量场来达到宇宙加速膨胀的效应。对于这类标量场的研究，现在已经有几个比较完整的理论框架；在这些框架下，人们列出了相关约束下这个标量场的所有可能的函数形式。

当我们引入了这种标量场后，它相当于是某种“宇宙学介质”，有可能导致引力波与光的传播速度不同。GW170817提供了引力波的速度与光速之间非常强的限制，即相对差异不能超过 10^{-15} ^[11]，从而导致若干大类描述暗能量的标量场模型不再适用^[29, 30]。另外，如果GW170817结合来自其他领域的观测(如星系团、M87星系中的黑洞等^[31, 32])，将能排除更多的参数空间，从而为后续的暗能量研究提供一个更明确的方向。关于GW170817对宇宙学理论的限制，可以参见图5的总结。

3.6 额外维

除了前面讨论的引力检验外，GW170817还可以用来进行一些其他引力模型的检验，如检验时空的维数^[19]。这是因为，在存在额外维的引力理论中，我们正常的物质在四维时空中运动，而引力却可以在额外的维度中穿越，示例见图6。这样一来，由于引力在额外的维度中运动会消耗额外的时间，所以对于相同的距离，引力波的传播会比光的传播花更多的时间。GW170817和GRB170817A几乎同时到达地球这个事实能够给出额外维参数的限制^[19]。

4 一些讨论

GW170817是个非比寻常的天文学探测，它不仅给出了诸多天文学方面的新的观测结果，也

$c_{GW}=c$ (存活)	$c_{GW}\neq c$ (被淘汰)	
广义相对论 第五作用/k-要素 Brans-Dicke/ $f(R)$ 运动学的引力编结	Galileon的四次和五次型 Fab Four de Sitter Horndeski $G_{\mu\nu}\phi'^{\mu}\phi'^{\nu}, f(\phi)\times$ Gauss-Bonnet	Horndeski 超出Horndeski
导数共形 非共形微调 $A_1=0$ 的DHOST的二次型	GLPV的四次和五次型 $A_1\neq 0$ 的DHOST的二次型 DHOST的三次型	

图5 GW170817测量后，Horndeski和超出Horndeski两大类引力理论的情况^[32]

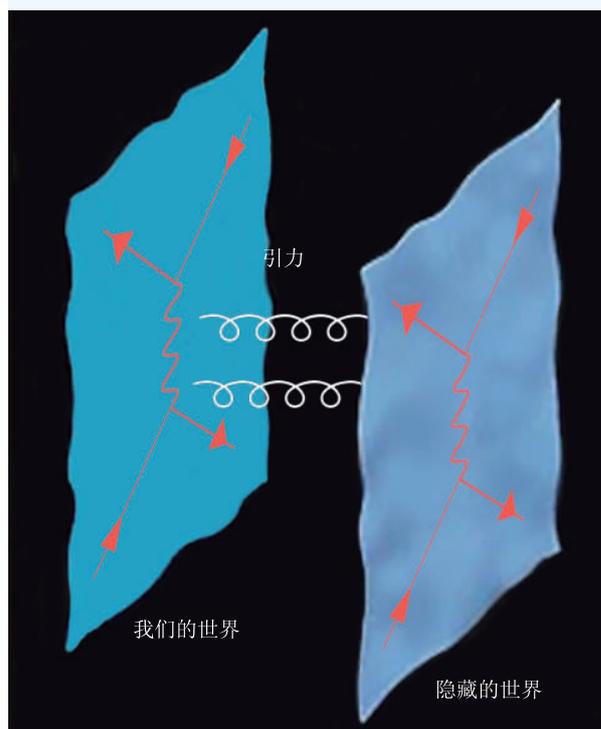


图6 额外维模型的示例。标准模型的粒子在平常的四维时空中运动，而引力可以“穿透”到更高的维度中运动(图片取自 learner.org)

是检验基本物理的一个重要事件。在本文中，我们简单讨论了GW170817在检验引力理论方面的作用。可以看到，GW170817从各个方面，对爱因斯坦的广义相对论进行了深入的检验。其中好几个检验都远远超出了之前检验的力度。总结来说，所有关于GW170817的观测都符合广义相对论的理论预言，爱因斯坦仍旧是对的！

GW170817是LIGO/Virgo合作组在第2次运

行(O2)中观测到的引力波事例。从2019年4月1日开始, LIGO/Virgo 合作组已经开始了第3次运行(O3)^[33], 并且已经发现了若干引力波候选体事例, 其中就包含有双中子星并合、黑洞中子星并合等候选体事例。这些新的候选体事例如果一经证实, 将会提供独立于GW170817的检验引力理论的天体物理实验室, 必将把引力检验往更深层次去推进。

另外, 第3代地面引力波探测器、空间引力波探测器、脉冲星测时引力波探测阵列等项目也在紧锣密鼓地开展, 会在不久的将来在更多频段上给出更高信噪比的引力波探测事例。这些事例, 必将为我们理解引力和时空提供更多的观测支撑。

5 写在最后

1955年4月18日, 科学巨人爱因斯坦病逝。在葬礼上, 医嘱执行者纳坦念了歌德悼念席勒的诗:

“我们全都获益不浅,
全世界都感谢他的教诲。
那专属于他个人的东西,
早已传遍广大人群。
他将像行将陨灭的彗星, 光华四射,
把无限的光芒同他的光芒永相结合。”

60多年后的2017年8月17日, 宇宙从远处派来的“信使”GW170817再次致敬了爱因斯坦和他的广义相对论。

即便如此, 出于对大自然和宇宙的好奇与敬畏, 我们对爱因斯坦的广义相对论的实验检验并不会停止。相反地, 在引力波和多信使时代, 来自双中子星并合的引力波给检验引力理论打开了一个全新的窗口, 使得我们能够探测诸多原先无法测量的引力理论的参数空间。这些观测, 让我们对替代引力、宇宙学等各个前沿学科有了一个更深刻的理解。

参考文献

- [1] Einstein A. Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.), 1915, 1915: 844
- [2] Einstein A. Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss., 1916, 1: 688
- [3] Einstein A. Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss., 1918, 1: 154
- [4] Thorne K S eds. Hawking S W, Israel W. Gravitational Radiation, in Three Hundred Years of Gravitation. Cambridge University Press, 1987. 330
- [5] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 061102
- [6] 刘见, 王刚, 胡一鸣等. 科学通报, 2016, 61(14): 1502
- [7] Abbott B P *et al.* arXiv: 1811.12907
- [8] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 161101
- [9] 来小禹, 徐仁新. 物理, 2019, 48(9): 554
- [10] Abbott B P *et al.* Astrophys. J. Lett., 2017, 848: L12
- [11] Abbott B P *et al.* Astrophys. J. Lett., 2017, 848: L13
- [12] 肖笛, 耿金军, 戴子高. 物理, 2019, 48(9): 545
- [13] Li L X, Paczynski B. Astrophys. J., 1998, 507: L59
- [14] 俞云伟. 物理, 2019, 48(9): 581
- [15] 徐东莲. 物理, 2019, 48(9): 593
- [16] 陈海亮, 陈雪飞, 韩占文. 物理, 2019, 48(9): 561
- [17] 张鹏杰. 物理, 2019, 48(9): 588
- [18] Will C M. Phys. Rev. D, 1998, 57: 2061
- [19] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 011102
- [20] Miao X, Shao L, Ma B Q. Phys. Rev. D, 2019, 99: 123015
- [21] Kostelecky V A, Russell N. Rev. Mod. Phys., 2011, 83: 11
- [22] Kostelecky V A, Tasson J. Phys. Lett. B, 2015, 749: 551
- [23] Shao L. Phys. Rev. D, 2014, 90: 122009
- [24] Bohe A, Shao L, Taracchini A *et al.* Phys. Rev. D, 2017, 95: 044028
- [25] 周恩平. 物理, 2019, 48(9): 573
- [26] Shao L *et al.* Phys. Rev. X, 2017, 7: 041025
- [27] Will C M. Living Rev. Relativity, 2014, 17: 4
- [28] Abbott B P *et al.* Nature, 2017, 551: 85
- [29] Baker T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 251301
- [30] Creminelli P, Vernizzi F. Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 251302
- [31] Sakstein J, Jain B. Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 251303
- [32] Ezquiaga J M, Zumalacárregui M. Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 251304
- [33] Abbott B P *et al.* Living Rev. Relativity, 2018, 21: 3