

GW170817 与标准汽笛宇宙学

张鹏杰[†]

(上海交通大学天文系 上海 200240)

2019-06-30收到

[†] email: zhangpj@sJTU.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20190907

GW170817 and standard siren cosmology

ZHANG Peng-Jie[†]

(Department of Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

摘要 GW170817实现了基于“标准汽笛”的首次哈勃常数 H_0 测量,开启了标准汽笛宇宙学的序幕。正在进行的双中子星并合引力波观测,有望在5年内测量 H_0 到约2%精度,提供解决 H_0 危机的独立而珍贵的数据。下一代的引力波实验,将通过标准汽笛方法,精确测量宇宙膨胀速度和宇宙大尺度结构,限制暗能量状态方程,在宇宙学尺度上检验广义相对论。

关键词 双中子星, 引力波, 宇宙学, 哈勃常数

Abstract The observation of GW170817 realized the first H_0 measurement through the standard siren method, and initiated the era of standard siren cosmology. Ongoing gravitational wave observations of binary neutron star mergers are expected to measure H_0 within 2% accuracy in five years time, and to provide independent data to solve the H_0 tension. The third generation experiments will be able to accurately measure the expansion and structure growth rate of the universe over a wide redshift range, put stringent constraints on the nature of dark energy, and test general relativity on a cosmological scale.

Keywords binary neutron stars, gravitational waves, cosmology, Hubble constant

1 GW170817: 标准汽笛宇宙学的开始

GW170817^[1], 人类探测到的第一个双中子星并合引力波事件, 在多个方面具有里程碑式的意义^[2-8]。就宇宙学而言, 它提供了区分修改引力和暗能量、探索宇宙加速膨胀机制的新途径^[7, 9]; 也开启了基于“标准汽笛”(standard siren)的宇宙学新纪元^[10-12]:

(1)结合宿主星系的红移, GW170817首次给出了基于标准汽笛的哈勃常数 H_0 独立测量^[12]。其精度达到了15%, 初试啼声就几乎追平了哈勃空间望远镜核心项目(Hubble key project)的测量精度(约11%);

(2)今后5年, LIGO、VIRGO等有望探测到几十个甚至上百个类似事件, 将 H_0 精度提高到约2%^[13], 从而为解决当前愈演愈烈的 H_0 危机提供关键数据;

(3)下一代的引力波实验将成量级地提高双中子星并合引力波事件的探测事例和探测深度。结合宿主星系红移, 将能够精确测量今天和过去的宇宙膨胀速度, 限制暗能量状态方程; 这些引力波事件也提供了测量宇宙大尺度结构的新途径, 能够精确测量弱引力透镜、星系本动速度等, 从而更好地探索宇宙加速膨胀机制; 显著提高的信噪比也使得完全基于引力波的红移测量成为可能, 不再受电磁观测的制约。

2 标准汽笛

图1是GW170817的观测结果。与常见的波一样,描述引力波的两个主要观测量是其频率 f 和振幅 h 。图1也展示了引力波的一个典型特征,其频率随时间变化,变化率为 df/dt 。由此可见描述引力波的几个可观测量: f 、 df/dt 、 h 。频率 f 由双中子星轨道频率决定(在四极矩近似下是其2倍),而 df/dt 则由引力波辐射导致。该双星系统因为引力波辐射损失能量,导致双星相互绕近、轨道频率变高、引力波幅度变大。 f 和 df/dt 完全由双中子星的质量、间距等决定。而振幅 h ,除去受上述因素影响外,还反比于距离 D 。Bernard Schutz于1986年指出,结合这三个观测量,可以反解出 $D^{[10]}$ 。该方法后来被称为“标准汽笛”^[11]。

距离的测量在天文学上具有极其重要的意义。例如,正是因为哈勃测量出了仙女座“星云”的距离,河外星系的存在才盖棺定论;也正是因为河外星系距离和红移的测量,才导致哈勃定律 $cz=H_0D$ 的发现。这里 z 是星系红移, cz 是星系退行速度, D 是星系距离。比例系数 H_0 即大名鼎鼎的哈勃常数,即宇宙今天的膨胀速度,也在很大程度上决定了宇宙的年龄($\sim 1/H_0$),是描述宇宙的基本参数之一;哈勃太空望远镜的三大核心课题之一就是精确测量河外天体的距离,从而确定 H_0 ;1998年Saul Perlmutter、Adam Riess、Brian Schmidt等也正是通过测量远至 $z\sim 1$ 的Ia型超新星距离,发现了宇宙加速膨胀。

天体测距方法中,造父变星和Ia型超新星等属于“标准烛光”(standard candle),在上述发现中居功厥

伟。它们经过恰当的处理后被认为具有恒定的、已知的绝对亮度 L ,所以可以通过比较其直接观测到的视亮度 F ,得到“光度距离” $D_L = \sqrt{L/4\pi F}$ 。与之相对应的是“标准尺”方法,其典型代表是重子声波振荡,对应于宇宙初始扰动在宇宙大尺度结构中留下的共动尺度恒定的声视界 $s\sim 140$ Mpc。通过测量其张角 $\Delta\theta$,可以得到“角直径距离” $D_A = s/\Delta\theta$ 。该方法自2005年在斯隆巡天首次实现以来,精度和红移不断提高,已实现了宇宙加速膨胀的独立验证。但是 s 的绝对数值需要通过宇宙微波背景辐射得到,因此重子声波振荡不能独立测量 H_0 。最传统的三角视差法利用了太阳—地球距离这样的已知尺度,也属于“标准尺”的范畴。

双星并合引力波事件,提供了第3种方法——“标准汽笛”:通过“聆听”频率越来越高、振幅越来越大的引力波,测量宇宙距离。该方法不依赖于任何距离阶梯,也不依赖于对双星系统质量、轨道参数等的假设。只要广义相对论成立,只要引力波测量准确,就能够准确测量宇宙距离。这是该方法极具吸引力和优势的地方。该方法首次应用到第一个引力波事件GW150917,测得 $D=410_{-180}^{+160}$ Mpc。之后被用到所

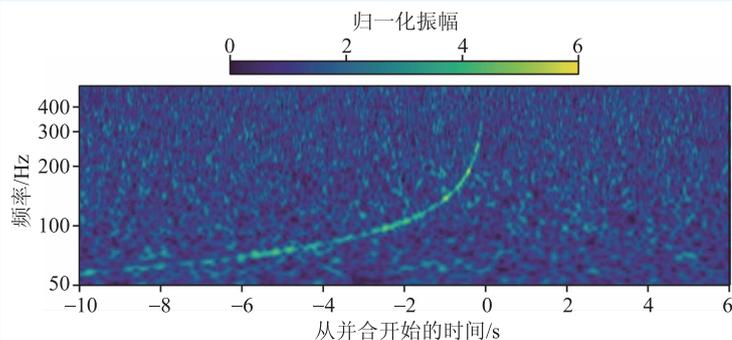


图1 GW170817的时间—频率—振幅图。横坐标为时间,纵坐标为频率,颜色代表引力波的强度^[1]

1) 我们可以在四极矩辐射近似、牛顿力学、圆轨道和点质量近似下,更定量得理解该方法。在上述近似下,
$$h(t) = \frac{(GM)^{5/3}}{c^4} \frac{f^{2/3}(t)}{D} Q(t, \Phi(t)), \quad \dot{f} = \frac{96\pi^{5/3}}{5} \left(\frac{GM}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$
其中, $f(t) = \dot{\Phi}(t)/(2\pi)$ 是引力波频率, $\Phi(t)$ 是引力波的相位, M 是两个中子星/黑洞质量 M_1 和 M_2 的特定组合(chirp mass), i 是轨道倾角, Q 是响应函数,取决于引力波干涉仪的位置/走向、轨道倾角和相位等因素。由上述关系关系可以推出 $D \propto \dot{f}/(hf^3)$,因此通过引力波观测即可测量距离,无需对双星质量、轨道参数等做假设。上述近似忽略的高阶修正项会引入对 M_1 、 M_2 等的依赖,但是仍然可以模型无关的求解得到距离 D 。实际数据分析中,则是通过波形匹配的多参数拟合来同时限制 D 和其他参数。

有引力波事件。对于GW170817, $D=40^{+8}_{-14}$ Mpc。光学观测锁定了GW170817的宿主星系为NGC 4993^[14], 红移为 $cz=3017\pm 166$ km/s^[12]。光学对应体的良好定位反过来显著改善了距离测量误差, 最终得到 $H_0=70.0^{+12.0}_{-8.0}$ km/s/Mpc^[12]。这是标准汽笛的首个 H_0 测量结果, 其重要性不言而喻。而且, 首次测量其精度就达到了~15%, 预示着可观的前景。

3 H_0 危机

虽然天文学家已经掌握了很多种测距方法²⁾, 宇宙学距离上的测距仍然极其艰难。传统方法是

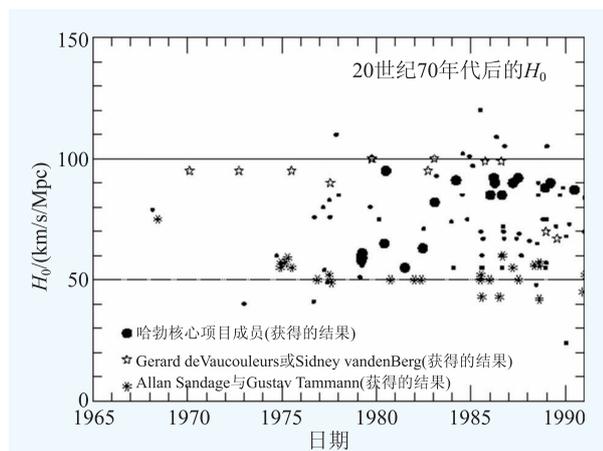


图2 20世纪70到90年代的 H_0 测量结果及分歧(<https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/hubble/>)

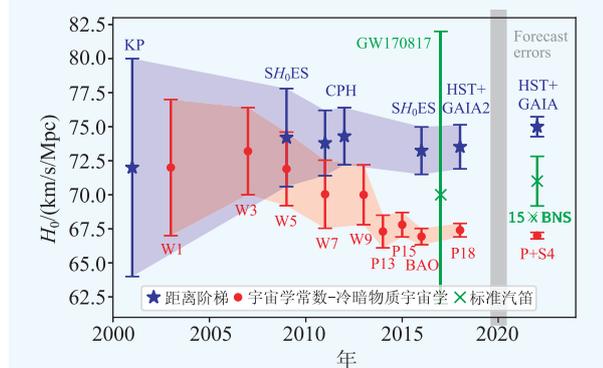


图3 H_0 危机(H_0 tension): 主要是基于近邻宇宙观测和高红移宇宙微波背景辐射观测得到的 H_0 不一致^[8]。2019年, 不一致性达到了相当显著的 4.4σ , 是宇宙学界激烈争议的话题^[9]

通过恒星三角视差、造父变星、水脉泽、Ia型超新星等一系列的距离阶梯, 从河内、近距离一步步推进到河外、宇宙学距离。每一层的距离阶梯都存在误差, 层层累加, 导致宇宙学距离的测量不确定性很大。 H_0 测量需要距离的绝对定标, 对距离测量的系统误差很敏感, 因此格外困难。20世纪70年代以来, 出现了哈勃常数是50 km/s/Mpc还是100 km/s/Mpc的争论(图2), 并一直贯穿90年代。解决这个争论, 是哈勃望远镜的主要科学使命之一。历经近10年观测, Wendy Freedman等测得 $H_0=74.0\pm 1.4$ km/s/Mpc, 解决了上述争论^[15]。

然而, 随着 H_0 测量精度的进一步提高, 新的问题出现了, 这就是近几年以来愈演愈烈的 H_0 危机^[16, 17](图3)。一方面, 近邻宇宙、基于距离阶梯的测量支持较高的数值, 也就是更快的宇宙膨胀速度。例如, 通过对造父变星、水脉泽和Ia型超新星的观测, Adam Riess团队的最新结果把误差降低到了2%, 测得 $H_0=74.0\pm 1.4$ km/s/Mpc^[16]。另一方面, 基于(高红移)宇宙微波背景辐射的观测和LCDM宇宙学标准模型, 宇宙学家发现 $H_0=67.45\pm 0.5$ km/s/Mpc, 整整小了9%^[17]。两者的差异达到了4.4个标准差。原因何在? 测量错误还是新物理? 众说纷纭, 仿佛80年代哈勃常数到底是50还是100的重演。无论结果如何, 都对宇宙学至关重要。如果是测量误差造成的, 那意味着我们测量宇宙的基本手段(超新星也好, 宇宙微波辐射也好)出现了系统性的偏差, 至关重要; 如果是新物理, 则有暗能量、宇宙曲率、中微子等多种已知的可能解释(所谓known unknown), 也可能是超出目前已知范围的新物理(所谓unknown unknown)。凡此种种, 都意味着 H_0 危机已成为宇宙学的瓶颈之一。

4 标准汽笛与 H_0

GW170817的 H_0 测量恰逢其时。它证实了标准汽笛的可行性, 精度达到了可观的15%。如果

2) 其他测距方法包括强引力透镜、水脉泽、Sunyaev Zel' dovich 效应、AP 效应等等。

有 N 个类似的引力波事例， H_0 测量精度将达到 $15\%/\sqrt{N}$ 。目前近邻宇宙 H_0 的测量精度约 2%，宇宙微波背景辐射测量精度为 0.7%，两者差异约 9%。这意味着，几十个事例就足以以为 H_0 危机提供统计上显著的独立数据，60 个事例就能超过近邻宇宙的测量精度，500 个事例就能够超过宇宙微波背景辐射的测量精度。而预期到 2026 年，LIGO、VIRGO 以及日本和印度的引力波干涉仪将能够探测到几十到几百个事例，而且单个事例的 H_0 测量精度有望好于 15%^[12](图 4)。所以，通过标准汽笛方法，有望在五六年的时间里，提供解决 H_0 危机的独立、精确数据。

5 标准汽笛宇宙学

解决 H_0 危机只是标准汽笛宇宙学的一个近期应用。它的应用前景极其宽广。如前所述，标准汽笛测距在原理上非常干净，避免了传统天体测距的各种系统误差。另一个重要的优点是，引力波的振幅随距离 $1/D$ 衰减。这意味着，如果引力波干涉仪灵敏度提高为原来的 4 倍，则探测深度提高 4 倍，探测体积和事例数提高 $4^3=64$ 倍。作为对比，天体(电磁)亮度随 $1/D^2$ 衰减，灵敏度提高 4 倍只带来探测深度 2 倍的提高和探测体积 8 倍的提高。因此，通过提高引力波干涉仪的灵敏度，能够迅速地扩大探测范围和事例数，从而快速提高对宇宙学参数的限制。

GW170817 的红移为 0.009。aLIGO 达到设计灵敏度后能够探测到 $z\sim 0.2$ 的双中子星并合。而下一代(第三代)引力波实验，例如爱因斯坦望远镜(Einstein Telescope, ET)和 Cosmic Explorer(CE, 图 5)等，将能够探测 $z\sim 2-4$ 的双中子星并合，探测速率达到每年 $\sim 10^5$ 。

这也意味着，对于相同红移的引力波事例来说，信噪比将提高约 10 倍。以 GW170817 为例，aLIGO O2 观测的信噪比为 32，CE/ET 观测信噪比将达到 ~ 300 ， H_0 测量精度将达到 $\sim 2\%$ /每事例。成量级提高的事例数、显著提高的信噪比、更好的定位精度，意味着不仅仅 H_0 ，而且宇宙膨胀速度的演化($H(z)$)以及暗能量状态方程等，都能够通过双中子星标准汽笛精确测出！

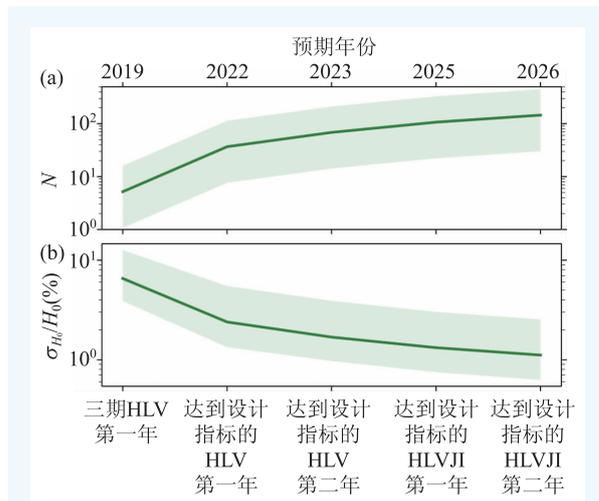


图 4 标准汽笛测量 H_0 的 5 年预测^[13]。到 2026 年，双中子星并合引力波探测事例有望超过 100，测量精度有望达到或超过 2%。该独立、精确的 H_0 测量有望解决当前的 H_0 危机(H: LIGO 的 Hanford 干涉仪; L: LIGO 的 Livingston 干涉仪; V: VIRGO; J: 日本的引力波干涉仪; I: 印度的引力波干涉仪)

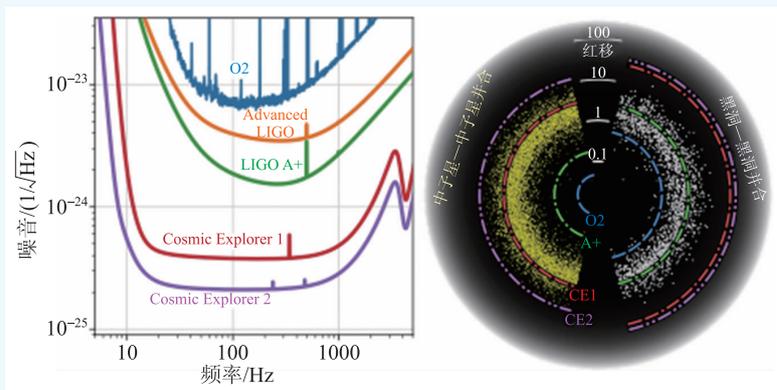


图 5 第二代和第三代引力波实验的探测灵敏度和探测深度^[18]

3) 这跟传统天文方法恰好相反。传统方法容易确定红移，而难于确定距离。
4) 中子星直径依赖于其状态方程。状态方程可以通过并合和铃宕阶段的引力波观测确定。结合该状态方程和旋近阶段的观测，就可以确定红移^[19]。

不仅如此,弱引力透镜、本动速度等宇宙大尺度结构,也能够通过标准汽笛测出,预期信噪比甚至显著超过已有和计划中的大规模星系巡天!其原理是,弱引力透镜和本动速度,会导致观测到的距离偏离该红移处的平均距离, $D^{\text{obs}}(z) \simeq \bar{D}(z)(1 + \alpha(z)\kappa + \beta(z)v)$ 。这里 κ 是弱引力透镜会聚, v 是本动速度沿视线方向的分量。这些大尺度结构测量是区分暗能量和修改引力的关键,传统上要通过大规模星系巡天(LSST、DESI、Euclid等)测量。而基于标准汽笛方法的测量,则有望超过传统方法的精度,也有望避免传统方法存在的系统误差,潜力惊人,值得深入研究!

6 红移?

但是,要实现标准汽笛宇宙学的惊人潜力,需要这些引力波事例的红移。虽然引力波自身数据能够很好地确定距离 D ,但是因为存在着(未知)红移和(未知)质量的简并,无法确定红移³⁾。而如果没有红移信息,则无法用来测量哈勃常数等宇宙学参数。直接的解决方法是通过电磁对应体的观测测量红移。但是,因为电磁对应体亮度 $1/D^2$ 的衰减等因素,对稍高红移的引力波事例而言,其红移测量都极具挑战,是标准汽笛宇宙

学的主要瓶颈之一。GW170817在这一点上非常幸运。

幸运的是,存在不依赖于直接电磁对应体观测的红移测量方法。首先,中子星不同于黑洞这样的点粒子,存在中子星直径这样的特征尺度。该特征尺度的存在,打破了上述红移和质量的简并^[9]。只要引力波实验足够灵敏,就可以仅通过引力波数据本身同时确定双中子星的红移和距离⁴⁾;另外,如果定位精度足够高,也可以在星系巡天数据中找到对应的星系,从而确定红移。该方法也适用于双黑洞并合这样的很可能没用电磁对应体的引力波事例;第三,未来的大样本数据保证了,即便单个事例的红移无法确定,通过宇宙大尺度结构的统计方法,引力波事例的统计红移总可以在很高精度上确定。

总而言之, GW170817标志着标准汽笛宇宙学的幸运开局,开启了通过标准汽笛测量宇宙膨胀速度和结构增长速度、探索暗能量和引力的崭新方向。正在进行的引力波项目,有望精确测量哈勃常数。而第三代和更加宏伟的再下一代项目,有望全面实现标准汽笛宇宙学的潜力,以前所未有的精准程度,揭示暗能量和宇宙学尺度上引力的性质。

参考文献

- [1] Abbott B P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 119: 161101
 [2] 周恩平. 物理, 2019, 48(9): 573
 [3] 肖笛, 耿金军, 戴子高. 物理, 2019, 48(9): 545
 [4] 俞云伟. 物理, 2019, 48(9): 581
 [5] 徐东莲. 物理, 2019, 48(9): 593
 [6] 陈海亮, 陈雪飞, 韩占文. 物理, 2019, 48(9): 561
 [7] 邵立晶. 物理, 2019, 48(9): 567
 [8] 来小禹, 徐仁新. 物理, 2019, 48(9): 554
 [9] Ezquiaga J M, Zumalacarregui M. Front. Astron. Space Sci., 2018, 5: 44
 [10] Schutz D B F. Nature, 1986, 323: 310
 [11] Holz E, Hughes S A. Astrophys. J., 2005, 629: 15
 [12] Abbott B P *et al.* Nature, 2017, 551: 85
 [13] Chen H Y, Fishbach M, Holz D. Nature, 2018, 562: 545
 [14] Abbott B P *et al.* Astrophys. J. Lett., 2017, 848: L12
 [15] Freedman W *et al.* ApJ, 2001, 553: 47
 [16] Riess A *et al.* Arxiv: 1903. 07603
 [17] Planck Collaboration, Aghanim N, Akrami Y *et al.* arXiv: 1807.06209
 [18] Reitze D. arXiv: 1903.04615
 [19] Messenger C, Read J. Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 091101