



借助引力波与射电天文学打造探索晚期宇宙的精确探针

张鑫^{1,2}

1. 东北大学理学院物理系, 沈阳 110819;

2. 东北大学智能工业数据解析与优化教育部重点实验室, 沈阳 110819

E-mail: zhangxin@mail.neu.edu.cn

Forging precision cosmological probes of exploring the late universe via gravitational-wave and radio astronomy

Xin Zhang^{1,2}

¹ Department of Physics, College of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

² MOE Key Laboratory of Data Analytics and Optimization for Smart Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China

E-mail: zhangxin@mail.neu.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2021-1141

解决宇宙学重大科学问题的前提和基础是对重要的宇宙学参数进行精确的测量。精确确定宇宙学参数通常需要联合不同的天文观测, 这是因为观测宇宙学与通常的实验室“桌面实验”不一样, 它不能通过人为设定和调节实验条件来单独测量某种效应, 只能通过“探测器”(如各波段望远镜)被动接收宇宙中的信息。这样的观测通常只能测量多种效应的组合, 因此多种观测的联合有助于打破各种效应之间的简并, 从而帮助确定宇宙学参数。在利用天文观测联合限制宇宙学参数时, 各种观测的和谐一致就显得格外重要, 因为观测间的不一致性通常意味着我们对宇宙学的理解产生了偏差。因此, 这种“宇宙和谐”的要求往往会在宇宙学的研究中发挥十分重要的作用。

例如, 早在1995年(彼时尚未发现宇宙加速膨胀), Ostriker和Steinhardt^[1]就利用“宇宙和谐”的要求预言宇宙学常数的存在, 并推测其能量约占宇宙总能量的70%(同时哈勃常数约为 $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)。今天看来, 这一预言非常成功, 而这样的成功却是利用当时极为不精确的天文观测来实现的。进入21世纪, 在最初的几年里, 人们就发现宇宙学常数-冷暗物质(Λ -cold dark matter, Λ CDM)模型可以实现“宇宙和谐”, 各种观测可以在模型参数空间中交汇于一处。那些年, 人们为找到了“和谐宇宙学模型”而欢呼雀跃。

近年来, 随着天文观测精度的提高, 对暗能量状态方程的限制精度达到了一个新的水平。当前的典型结果为: 利用最新的CMB+BAO+SN数据(简记为CBS; 此处CMB为宇宙微波背景数据, BAO为重子声学振荡数据, SN为Ia型超新星数

据)进行联合限制, 对于常数 w , 精度约为3%; 对于演化的 $w(z)$ (用 w_0 和 w_a 来参数化), w_0 的精度约为8%, w_a 的误差约为0.3。然而, 目前对暗能量的限制精度尚不足以让我们理解暗能量的本质属性。

另一方面, 近几年还出现了哈勃常数测量的不一致性问题, 已经引发了新的宇宙学危机, 被称为“哈勃危机”。利用早期宇宙的CMB观测并结合 Λ CDM模型, 可推断出哈勃常数的值, 约为 $67 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (精度约为0.8%)。而利用距离阶梯方法在晚期宇宙中直接测量哈勃常数, 得到的值约为 $74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (精度约为1.8%)。二者之间有约10%的不一致性, 置信度已超过4倍标准偏差。

如何理解哈勃常数不一致性? 一方面, 可能是哪一方的测量出现了错误, 所以找到新的方法来独立地给出哈勃常数的新的精确测量, 从而对此进行第三方裁决, 将是十分重要的。另一方面, 如果早期宇宙和晚期宇宙的测量都是可靠的, 那么就只能是我们对宇宙的理解出现了错误, 即当前的“标准模型” Λ CDM是有问题的, 需要修改或扩展。换句话说, 我们需要寻找超出当前标准模型的新物理, 以达到新的“宇宙和谐”。当前, 尽管在修改宇宙学模型方向已有大量的研究工作, 但是并没有找到一个真正能够解决哈勃危机的宇宙学模型^[2~7]。

无论从哪个角度, 发展新的晚期宇宙精确探针对于未来的宇宙学发展都是极其重要的任务。当前唯一能够称得上精确宇宙学探针的观测就是CMB, 因为它可以在 Λ CDM模型下实现“精确宇宙学”(宇宙学参数测量的精度好于1%)。但是

CMB的问题是,它是早期宇宙观测,无法精确限制晚期宇宙的物理;如果对 Λ CDM模型进行扩展,比如把宇宙学常数改为动力学暗能量,那么CMB的限制将产生严重的参数简并,无法对暗能量状态方程进行有效的测量.因此,无论是对于探索暗能量的本质属性,还是对于解决早期宇宙与晚期宇宙之间的不一致性,都需要大力发展晚期宇宙的精确探针.

未来引力波与射电天文学的发展必将在宇宙学研究中发挥极为重要的作用.基于引力波与射电天文学将可能打造出晚期宇宙的精确探针,对暗能量状态方程实施精确测量.

引力波的探测打开了人类观测宇宙的新窗口.利用引力波的波形,可以测量我们到波源的距离.特别需要指出的是,这个距离是绝对距离而不是相对距离,对宇宙学研究至关重要.如果还能测量波源的红移,那么就可以通过距离-红移关系来开展宇宙学研究了.这被称为“标准汽笛”方法.双中子星并合事件GW170817的探测实现了通过标准汽笛方法对哈勃常数的独立测量,但是由于只有1个数据点,其精度只能达到15%左右,不足以对哈勃危机的成因进行判定^[8].未来要建设的第三代地面引力波探测器“爱因斯坦望远镜”(Einstein Telescope, ET)和“宇宙勘探者”(Cosmic Explorer, CE)将探测到海量的双中子星并合事件,即便其中只有一小部分可探测到电磁对应体,在10余年的观测周期内也可以获取大量的“亮汽笛”数据(据推测,大约10年的观测可积累近千个亮汽笛数据).那么,在ET和CE时代,引力波观测能够将宇宙学参数测量到什么程度呢?

利用ET或CE的引力波标准汽笛观测可以将哈勃常数测到约0.3%的精度,显著好于CBS的限制精度^[9,10].但是,标准汽笛在限制其他宇宙学参数方面却并无优势可言,例如,对于暗能量的常数 w 状态方程,标准汽笛观测只能给出约12%的限制精度.近期的一系列研究发现,引力波标准汽笛的优势并不在于单独测量宇宙学参数,而是在于它可以有效打破其他观测带来的宇宙学参数简并,从而在联合限制中起到关键性作用^[9-12].这是因为引力波观测可以测量绝对距离,因而可以高精度测量哈勃常数,这就导致在参数空间中形成的简并方向与其他观测显著不同.研究表明,引力波可以有效打破CBS的简并,因此与CBS联合即可以将 w 限制到约2%的精度^[9,10].

事实上,在第三代地面引力波探测的时代,仅利用ET和CE的引力波探测,无须电磁对应体观测,就可以开展宇宙学研究.在双中子星并合的最后阶段,中子星的潮汐形变会影响引力波(高频部分)的相位,而从相位的精确测量中即可读出红移的信息.第三代地面探测器会大量观测双中子星并合

事件,据推测,此类暗汽笛的观测事件数可达十万至百万量级,由此单独利用ET的引力波观测即可将 w 限制到好于3%的精度;而ET和CE组成的探测网络可以将 w 限制到1%甚至0.2%的精度.因此,未来利用引力波观测将极有可能实现对暗能量的精确宇宙学测量.

空间引力波探测器(如太极、天琴、LISA)可探测低频引力波(毫赫兹波段),大质量双黑洞产生的引力波处于这一波段,而利用光学和射电望远镜也有可能观测其电磁对应体,因而利用空间引力波探测也可以探索宇宙的膨胀历史^[13,14].最近的研究表明,如果太极和LISA组成探测网络,那么其标准汽笛观测可实现哈勃常数的精确测量,而且联合CMB即可将 w 限制至约4%的精度(与CBS大致相当)^[15].注意,这类电磁对应体可观测的数量极少,大概只能找到几十个.

此外,射电天文学也将在宇宙学研究中发挥极重要的作用.这可以体现在以下几个方面:(1)中性氢巡天观测可测量大尺度结构,探测重子声学振荡和红移空间畸变信号,从而实现暗能量的测量^[16-18].(2)利用射电望远镜监测银河系内大量的毫秒脉冲星(即脉冲星测时阵列),可探测超低频引力波(纳赫兹波段),因此可实现利用超大质量双黑洞开展标准汽笛宇宙学研究^[19].(3)未来可观测到大量的可定位的快速射电暴(fast radio burst, FRB; 可测量红移),因此有可能将FRB打造成强有力的宇宙学探针^[20].(4)利用中性氢21厘米吸收线(或者发射线)可实现红移漂移观测,从而直接测量宇宙膨胀历史^[21].(5)利用甚长基线干涉测量对双中子星并合射电对应体的喷流进行射电成像观测,可测量双星系统的轨道倾角,从而打破引力波测量中的距离-倾角简并,这可极大地提升标准汽笛的观测精度^[22].近期的研究表明,射电天文学也将助力实现晚期宇宙的精确探针.譬如说,引力波与中性氢巡天结合,可将哈勃常数测量到0.4%的精度,将 w 测量到约2.8%的精度(好于CBS)^[23].利用上万个可定位FRB即可有效打破CMB的简并,对宇宙学参数的限制要显著优于CMB+BAO^[20];当然,在平方公里阵列射电望远镜(Square Kilometre Array, SKA)的时代,可定位FRB的探测数量将可能达到十万至百万量级,因此单独利用FRB即有望实现晚期宇宙的精确探针,对 w 的限制可达5%甚至2%的精度.

因此,我们看到,未来引力波与射电天文学的发展将是极为令人兴奋的,借助引力波与射电探测,有望打造出强大的晚期宇宙探针.在未来的10~20年,光学巡天结合引力波与射电探测将有力地推动宇宙学的发展,有望破解宇宙学领域的若干重大科学难题.

推荐阅读文献

- 1 Ostriker J P, Steinhardt P J. The observational case for a low-density Universe with a non-zero cosmological constant. *Nature*, 1995, 377: 600–602
- 2 Riess A G. The expansion of the Universe is faster than expected. *Nat Rev Phys*, 2020, 2: 10–12
- 3 Guo R Y, Zhang J F, Zhang X. Can the H_0 tension be resolved in extensions to Λ CDM cosmology? *J Cosmol Astropart Phys*, 2019, (2): 054

- 4 Liu M X, Huang Z Q, Luo X L, et al. Can non-standard recombination resolve the Hubble tension? *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 290405
- 5 Zhang X, Huang Q G. Measuring H_0 from low- z datasets. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 290402
- 6 Feng L, He D Z, Li H L, et al. Constraints on active and sterile neutrinos in an interacting dark energy cosmology. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 290404
- 7 Qi J Z, Zhang X. New observational evidence for a closed Universe and crisis for cosmology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 3773–3775 [祁景钊, 张鑫. 闭合宇宙的新观测证据与宇宙学的危机. 科学通报, 2019, 64: 3773–3775]
- 8 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature*, 2017, 551: 85–88
- 9 Zhang J F, Zhang M, Jin S J, et al. Cosmological parameter estimation with future gravitational wave standard siren observation from the Einstein Telescope. *J Cosmol Astropart Phys*, 2019, (9): 068
- 10 Zhang J F, Dong H Y, Qi J Z, et al. Prospect for constraining holographic dark energy with gravitational wave standard sirens from the Einstein Telescope. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 217
- 11 Jin S J, He D Z, Xu Y, et al. Forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard siren observation from the Cosmic Explorer. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, (3): 051
- 12 Zhang X. Gravitational wave standard sirens and cosmological parameter measurement. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 110431
- 13 Zhao Z W, Wang L F, Zhang J F, et al. Prospects for improving cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from Taiji. *Sci Bull*, 2020, 65: 1340–1348
- 14 Wang L F, Zhao Z W, Zhang J F, et al. A preliminary forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from TianQin. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, (11): 012
- 15 Wang L F, Jin S J, Zhang J F, et al. Forecast for cosmological parameter estimation with gravitational-wave standard sirens from the LISA-Taiji network. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2022, 65: 210411
- 16 Xu Y D, Zhang X. Cosmological parameter measurement and neutral hydrogen 21 cm sky survey with the Square Kilometre Array. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2020, 63: 270431
- 17 Xu Y D, Zhang X. The Square Kilometre Array and 21 cm cosmology (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 079801 [徐怡冬, 张鑫. SKA与21 cm宇宙学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 079801]
- 18 Chen X L. Exploring the 21 cm cosmology: The Tianlai and Hongmeng experiments (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 1385–1398 [陈学雷. 21 cm宇宙学的探索——天籁与鸿蒙实验. 科学通报, 2021, 66: 1385–1398]
- 19 Yan C, Zhao W, Lu Y. On using inspiraling supermassive binary black holes in the PTA frequency band as standard sirens to constrain dark energy. *Astrophys J*, 2020, 889: 79
- 20 Zhao Z W, Li Z X, Qi J Z, et al. Cosmological parameter estimation for dynamical dark energy models with future fast radio burst observations. *Astrophys J*, 2020, 903: 83
- 21 Liu Y, Zhang J F, Zhang X. Real-time cosmology with SKA. *Eur Phys J C*, 2020, 80: 304
- 22 Hotokezaka K, Nakar E, Gottlieb O, et al. A Hubble constant measurement from superluminal motion of the jet in GW170817. *Nat Astron*, 2019, 3: 940–944
- 23 Jin S J, Wang L F, Wu P J, et al. How can gravitational-wave standard sirens and 21 cm intensity mapping jointly provide a precise late-universe cosmological probe? *Phys Rev D*, 2021, 104: 103507