

# 天琴对宇宙膨胀的探测能力研究\*

李霄栋<sup>1</sup>, 肖小圆<sup>1</sup>, 王凌风<sup>2</sup>, 赵泽伟<sup>2</sup>, 张鑫<sup>2</sup>

1. 中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082
2. 东北大学理学院, 辽宁 沈阳 110004

**摘要:** 经过近几十年的发展, 宇宙学的研究已经进入精确宇宙学时代。根据 Planck 测量结果和  $\Lambda$ CDM 模型, 只需要 6 个参数就可以在统计意义上重现出与观测数据基本符合的宇宙演化历史。但是实际上, 当前宇宙学领域中还存在许多未解决的重要科学问题, 而且不同的观测数据在基于基本  $\Lambda$ CDM 模型进行宇宙学参数推断时会出现一些不一致性。这些问题的回答都需要对基本  $\Lambda$ CDM 模型进行扩展, 并对额外引入的参数进行精确的测量。目前主流的宇宙学探针主要是针对宇宙的膨胀历史和宇宙的结构增长进行观测的光学 (以及近红外) 项目, 因此它们可能存在着相似的系统误差。发展全新的非光学观测手段的宇宙学探针对于宇宙学未来的研究至关重要。因为引力波振幅携带了绝对光度距离的信息, 所以能够帮助建立真正的距离——红移关系, 用以研究宇宙的膨胀历史。这种引力波观测被称为“标准汽笛”。宇宙学研究是天琴、LISA 等空间引力波探测器的重要研究目标之一。这些探测器预计都可以在未来观测到大量的引力波事件, 为宇宙学研究 (特别是高红移宇宙) 提供珍贵的观测数据。本文参考相关的文献, 介绍了天琴标准汽笛数据限制宇宙学参数能力的情况。考虑了 pop III、Q3nod 和 Q3d 三种大质量黑洞双星模型, 结果表明, 对于不同的大质量黑洞双星模型, 天琴项目对宇宙学参数的限制能力各有不同, 其中 Q3nod 模型下的限制能力最强。天琴的标准汽笛探测有助于打破其他观测手段所导致的宇宙学参数简并, 从而有效地提升宇宙学参数的测量精度。我们有理由相信, 未来的引力波观测与光学和射电观测相结合将把宇宙膨胀历史的探索推进至一个全新的层面, 为探测哈勃常数大小、揭示暗能量的本质属性提供帮助。

**关键词:** 宇宙学; 宇宙大尺度结构; 宇宙学参数

**中图分类号:** P159.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 01-0062-12

## Research on Tianqin's capability of probing the cosmic expansion

LI Xiaodong<sup>1</sup>, XIAO Xiaoyuan<sup>1</sup>, WANG Lingfeng<sup>2</sup>, ZHAO Zewei<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>

1. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-sen University (Zhuhai Campus), Zhuhai 519082, China
2. College of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China

**Abstract:** After decades of development, the research of cosmology has entered the epoch of precision cosmology. According to the Planck observational results and the  $\Lambda$ CDM model, we need only 6 parameters to reproduce the evolution history of the universe which is consistent with the observed data in a statistical sense. However, in fact, there are still many unsolved important scientific problems in the field of cosmology, and there will be some inconsistencies in different observational data when inferring cosmological parameters based on the basic  $\Lambda$ CDM model. The answers to these questions require extension of

\* 收稿日期: 2020-11-18 录用日期: 2020-11-19 网络首发日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金 (11803094); 广州市基础与应用基础研究项目 (202002030360)

作者简介: 李霄栋 (1986年生), 男; 研究方向: 大尺度结构; E-mail: lixiaod25@mail.sysu.edu.cn

通信作者: 张鑫 (1977年生), 男; 研究方向: 宇宙学; E-mail: zhangxin@mail.neu.edu.cn

the basic  $\Lambda$ CDM model and accurately measurements of the additional parameters. At present, the mainstream cosmological probes are mainly optical (and near-infrared) observations of the expansion history and structural growth of the universe, so they may have similar systematic errors. It is very important for the future research of cosmology to develop new non-optical observational probes. Because the amplitude of gravitational wave carries the information of absolute luminosity distance, it can help us to establish the real distance-redshift relation and study the expansion history of the universe. This observation of gravitational waves is known “standard siren”. Cosmological research is one of the important research objectives of the Tianqin space gravitational wave detector, which is expected to be able to observe a large number of gravitational wave events in the future, providing valuable observational data for the study of cosmology (especially at high redshift). In this paper, we introduce previous researches about the ability of Tianqin standard siren data to constrain the cosmological parameters. We consider pop III, Q3nod and Q3d models. The results show that for different binary models of massive black holes, the Tianqin project yields to different constraining results on the cosmological parameters, and the Q3nod model has the strongest ability. The standard siren detection of Tianqin is helpful to break the degeneracy of cosmological parameters caused by other observation methods, so as to effectively improve the measurement accuracy of cosmological parameters. We have reason to believe that the future gravitational wave observations combined with optical and radio observations will promote the exploration of the history of cosmic expansion to a new level, and provide help to detect the size of Hubble constant and reveal the nature of dark energy.

**Key words:** cosmology; large-scale structure of universe; cosmological parameters

## 1 宇宙膨胀简介

### 1.1 宇宙学基础

1.1.1 宇宙膨胀与大爆炸宇宙学 1929年, Edwin Hubble<sup>[1]</sup>在PNAS发表了著名文章,发现遥远的星系正在远离我们而去,在观测上表现为光谱的红移,且红移的大小与距离成正比

$$v = H_0 d. \quad (1)$$

这一关系被称为哈勃定律,即星系的退行速度 $v$ 与距离 $d$ 成正比例,其比例系数为哈勃常数 $H_0$ 。哈勃对宇宙膨胀的发现改变了人们对宇宙的看法。人们心中根深蒂固的静态、永恒不变的宇宙观被推翻,取而代之的是美籍俄裔物理学家 George Gamow 提出的大爆炸宇宙学,认为宇宙经历过一个温度和密度都极高的演化阶段,随着宇宙膨胀,宇宙的能量密度和温度逐渐下降,形成了我们今天看到的宇宙。

在提出大爆炸理论的同时, Gamow 与 Alpher, Hermann 还一起分析了大爆炸理论下宇宙诞生时的原初核合成状况<sup>[2]</sup>,并预言了宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)的存在<sup>[3]</sup>。1964年,贝尔电话实验室的两位工程师 Arno Penzias 和 Robert Wilson 在用射电望远镜研究噪声背景时

发现了这一辐射。现代宇宙学的主要理论,如暴胀理论, CMB 理论与大尺度结构形成理论,都是基于大爆炸理论发展出来的。

1.1.2 宇宙的时空结构与动力学 下面介绍宇宙时空几何与动力演化的 FRW 度规与 Friedmann 方程。

1) 时空背景 描述宇宙时空的基本假设是宇宙学原理,即宇宙在大尺度上是均匀且各向同性的,而描述均匀各向同性宇宙的最一般的时-空度规是 Friedman-Robertson-Walker (FRW) 度规

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right], \quad (2)$$

式中 $a(t)$ 是一个无量纲的时间函数,也称为尺度因子或膨胀参数,用来描述宇宙在线度上的大小,为方便起见,一般取当前时刻尺度因子的值为1,即 $a_0 \equiv a(t_0) = 1$ (用下标“0”来代表物理量在当前的值); $t$ 是宇宙标准时, $r, \theta, \varphi$ 是共动球坐标系中的坐标, $k$ 表示空间曲率, $k = +1, 0$ 或 $-1$ ,分别对应于闭宇宙、平坦宇宙及开宇宙(当前宇宙的曲率 $k$ 近似为0)。本文中除特别说明外,光速 $c$ 取1。

随着宇宙的膨胀,遥远的星系或星系团是远离我们而去的,由 Doppler 效应可知,这些天体发

出的光会发生红移, 定义红移  $z$  为

$$1 + z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{emit}}} = \frac{1}{a}, \quad (3)$$

其中  $\lambda_{\text{obs}}$  和  $\lambda_{\text{emit}}$  分别为接收到的光子波长和光子的发射波长。

**2) 动力学** 广义相对论中, 引力系统的动力学方程可以由 Einstein 方程描述, 即

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}, \quad (4)$$

式中  $R_{\mu\nu}$  和  $R$  分别是里奇 (Ricci) 张量曲率和标量曲率;  $G$  为万有引力常数;  $T_{\mu\nu}$  是总能动量张量, 它不仅包含物质项和辐射项, 也包含宇宙学常数项  $\Lambda g_{\mu\nu}$ , 其中  $\Lambda$  是宇宙学常数。将 FRW 度规代入 (4) 式中可求解  $R$  与里奇张量  $R_{\mu\nu}$ , 所以, Einstein 方程可以约化为

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p), \quad (6)$$

其中符号 “ $\cdot$ ” 和 “ $\ddot{\cdot}$ ” 表示对时间求一次导和二次导,  $\rho$ 、 $p$  分别为宇宙的总能量密度与总压强。这组方程称为 Friedmann 方程。它描述了宇宙的动力学演化的性质, 表明了宇宙演化过程中宇宙能量组分之间的关系。对非相对论性粒子  $p = 0$ , 对辐射  $p > 0$ 。目前宇宙学观测表明当前宇宙是加速膨胀的, 即  $\ddot{a} > 0$ 。

Hubble 参数可以用尺度因子的一阶导数表示为

$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a}, \quad (7)$$

它描述了标度因子随时间的变化速率。 $H$  的数值可通过多种观测方法来确定。通常使用无量纲常数  $h$  来描述当前的 Hubble 参数值  $H_0$  (即哈勃常数) 的大小:

$$H_0 = 100h \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1} = \frac{h}{0.98 \times 10^{10} \text{ years}}, \quad (8)$$

其中 Mpc (百万秒差距) 为天文学距离单位。将 (7) 式代入 Friedmann 方程有

$$3M_p^2 \left( H^2 + \frac{k}{a^2} \right) = \rho, \quad (9)$$

$$-2M_p^2 \left( \dot{H} - \frac{k}{a^2} \right) = \rho + p, \quad (10)$$

其中  $M_p \equiv 1/\sqrt{8\pi G}$  为普朗克质量。

定义 “临界密度”<sup>①</sup> 为

$$\rho_c \equiv 3M_p^2 H^2. \quad (11)$$

在一个  $k = 0$  的平坦宇宙中, 宇宙各组分的能量密度总和恰好等于临界密度, 即  $\rho = \rho_c$ 。

**1.1.3 宇宙的能量组分** 定义宇宙不同能量组分的状态参数为

$$w_i = \frac{p_i}{\rho_i}. \quad (12)$$

相对论性气体满足  $w_r = 1/3$ , 非相对论性物质 (主要是重子、暗物质, 以下统称为物质) 满足  $w_m = 0$ ; 对宇宙学常数有  $w_{\text{de}} = -1$ 。在宇宙膨胀过程中, 共动体积内的能量守恒, 给出

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0. \quad (13)$$

因此, 能量密度随宇宙膨胀的演化满足

$$\rho \propto a^{-3(1+w)}. \quad (14)$$

为方便起见, 定义

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_c}, \Omega_r \equiv \frac{\rho_r}{\rho_c}, \Omega_k \equiv \frac{-k}{a^2 H^2}, \Omega_{\text{de}} \equiv \frac{\rho_{\text{de}}}{\rho_c}, \quad (15)$$

这里  $\Omega_m$ 、 $\Omega_r$ 、 $\Omega_k$ 、 $\Omega_{\text{de}}$  分别表示当前物质、辐射、曲率、暗能量占宇宙临界密度的比值。它们当前的数值能够比较精确地由宇宙学观测确定。如 Planck 卫星 2018 年观测给出结果为<sup>[4]</sup>

$$\Omega_m = 0.3166 \pm 0.0084,$$

$$\Omega_b h^2 = 0.02236 \pm 0.00015. \quad (16)$$

目前观测支持  $w_{\text{de}} = -1$ , 即暗能量性质为宇宙学常数  $\Lambda$ 。因此, 宇宙学常数暗能量与冷暗物质 (Cold Dark Matter, CDM) 组成的  $\Lambda$ CDM 宇宙模型成为主流模型, 可解释绝大多数观测。

**1.1.4 宇宙学距离** 对宇宙的观测是被限制在过去光锥  $ds^2 = 0$ , 因此某个光源与我们的共动距离为

$$\chi(a) = \int_{t(a)}^{t_0} \frac{dt'}{a(t')} = \int_a^{t_0} \frac{da'}{a'^2 H(a')}. \quad (17)$$

定义角直径距离  $d_A$  为

$$d_A = \frac{l}{\theta}, \quad (18)$$

其中  $\theta$  和  $l$  分别是天体的张角及其尺度大小。从 FRW 度规中可以推导出  $d_A$  与共动距离的关系:

$$d_A(z) = \frac{1}{(1+z)^2 H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} f_k \left( H_0 \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right), \quad (19)$$

这里

$$f_k(x) = \begin{cases} \sin(x), & \text{if } \Omega_k < 0 (k = 1), \\ x, & \text{if } \Omega_k = 0 (k = 0), \\ \sinh(x), & \text{if } \Omega_k > 0 (k = -1). \end{cases} \quad (20)$$

①这一名词的由来是, 因为当宇宙中只有普通物质时, 宇宙能量密度与  $\rho_c$  的关系决定了宇宙未来的演化历史。

对平坦宇宙有

$$d_{\Lambda}^{\text{flat}} = \frac{1}{1+z} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}. \quad (21)$$

天体的距离也可以通过测量已知亮度天体的视亮度获得

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2}, \quad (22)$$

其中  $L$  是已知的天体的亮度,  $F$  为接收到的能流。

可以证明, 角直径距离  $d_{\Lambda}$  与光度距离  $d_L$  有如下关系:

$$d_L(z) = (1+z)^2 d_{\Lambda}(z). \quad (23)$$

通过超新星与重子声学振荡的手段, 光度距离和角直径距离在探测宇宙膨胀上扮演了非常重要的角色。

## 1.2 宇宙加速膨胀

1998 年 Ia 型超新星 (SNIa) 标准烛光的观测发现宇宙正在加速膨胀<sup>[5-6]</sup>。通过光度距离-红移关系可对于宇宙的膨胀历史作出限制。超新星距离模数  $\mu$  在观测上定义为视星等  $m$  与绝对星等  $M$  之差, 理论上它正比于光度距离的对数, 即

$$\mu_{\text{obs}} = m - M, \mu_{\text{th}} = 5 \log_{10} \left( \frac{d_L}{\text{Mpc}} \right) + 25. \quad (24)$$

**1.2.1 理论意义** 发现宇宙加速膨胀之前, 人们已经为“宇宙学常数问题”困扰数十年。量子场论计算得到的真空能大小为

$$\rho_{\text{vac}} = \frac{1}{2V} \sum_i w_i = \int \frac{k^2 dk}{4\pi^2} (k^2 + m^2)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\lambda^4}{16\pi^2}, \quad (25)$$

其中  $\lambda$  截断如取作 Planck 能标  $M_p$ , 可得到真空能密度  $10^{71} \text{ GeV}^4$ , 在爱因斯坦方程中为非常巨大的宇宙学常数项, 但它的引力效应并没有被发现。宇宙加速膨胀的发现表明可能存在大小为  $10^{-46} \text{ GeV}^4$  大小的宇宙学常数, 比理论预言小 120 个数量级<sup>[7-8]</sup>。

在不涉及宇宙学常数问题的情况下, 解释宇宙的加速膨胀有两种途径: 一种是认为宇宙存在类似暗能量的能量组分, 具有负压强; 一种是认为我们的引力理论在大尺度上是失效的, 即所谓的修改引力理论。

**1) 暗能量唯象模型** 最常见的暗能量唯象模型认为它为某种流体, 如最早提出的 quintessence (精质) 场<sup>[9-10]</sup>

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_{\mu} \phi \partial_{\nu} \phi - V(\phi) \right]. \quad (26)$$

其能量密度  $\rho$  与压强  $p$  满足

$$\rho = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi), p = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi). \quad (27)$$

基于 quintessence 目前有多种推广的场论模型, 例如具有负动能项的 phantom 模型<sup>[11]</sup>, 可以给出  $w < -1$  的暗能量组分, 但面临不稳定、破坏洛伦兹不变性等一系列问题<sup>[12-13]</sup>。将 quintessence 与 phantom 结合可以得到  $w$  能够越过  $-1$  的 quintom 模型<sup>[14]</sup>。进一步推广动能项的形式可以得到所谓的  $k$ -essence 模型<sup>[15-17]</sup>, ghost condensation<sup>[18-19]</sup>, kinetic gravity braiding<sup>[20-23]</sup>。对标量场理论的进一步推广还可以得到旋量场<sup>[24-27]</sup>, 矢量场<sup>[28-29]</sup>,  $p$ -形式场<sup>[30-31]</sup>等模型。

其他常见的模型有具有  $p = -A\rho^{\alpha}$  形式的 Chaplygin 气体<sup>[32-35]</sup>, 动力学性质由宇宙视界决定的全息暗能量模型<sup>[36]</sup>, 以及与观测更相关的直接参数化, 如  $w_{\text{de}}(z) = w_0 + w_a z / (1+z)$ <sup>[37-38]</sup>,  $w_0 + w_1 z$ <sup>[39]</sup>,  $w_0 + w_a z / (1+z)^p$ <sup>[40]</sup> 等。

**2) 修改引力** 宇宙加速膨胀也可能是广义相对论在大尺度上失效导致的。目前人们已经研究过很多相关修改引力模型, 如:  $f(R)$  理论<sup>[41-44]</sup>, MOND<sup>[45]</sup>, TeVeS<sup>[46]</sup>, DGP 引力<sup>[47]</sup>, 标量-张量 (scalar-tensor) 理论<sup>[48-49]</sup>, Gauss-Bonnet<sup>[50-51]</sup>, Lovelock<sup>[52]</sup>, Horava-Lifshitz 理论<sup>[53]</sup>,  $f(T)$  理论<sup>[54-55]</sup>, 共形引力 (Conformal Gravity)<sup>[56]</sup>, 等。

区分暗能量组分与修改引力理论在观测上是一个非常重要的课题。引力波的发现打开了另一个探测引力的窗口。将来与电磁信号探测结合, 可得到更多关于引力本质的信息。

**1.2.2 观测支持** 除超新星观测外, 宇宙加速膨胀已经得到众多其他观测方法支持。下面列出几种<sup>[8, 57]</sup>。

**1) 重子声学振荡** 重子声波振荡 (Baryon Acoustic Oscillation, BAO) 是早期宇宙中声波振荡留下的遗迹。早期炙热的宇宙中, 光子与重子物质通过汤姆逊散射耦合在一起, 压强与引力对抗产生振荡, 造成物质分布的疏密不均, 其尺度对应“声学视界”

$$r_s(z) = \int_0^{t_{\text{rec}}} c_s (1+z) dt = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^{1/(1+z_*)} \frac{da}{a^2 H(a) \sqrt{1 + (3\Omega_b/4\Omega_{\gamma})a}}, \quad (28)$$

其中  $t_{\text{rec}}$  为光子脱耦的时刻, 大约对应红移  $z_* \approx 1100$ 。BAO 信号是天文学上的“标准尺”。当前的观测项目有 2dFGS (Two-degree-Field Galaxy Redshift Survey)<sup>[58]</sup>, SDSS<sup>[59]</sup>, 6dFGS<sup>[60]</sup>, WiggleZ

Dark Energy Survey<sup>[61]</sup>等。

2) **弱引力透镜** 弱引力透镜(Weak Lensing, WL)是引力弯曲时空导致光传播路径的扭曲,从而产生的遥远星系图像的改变。通过对弱引力透镜的观测,可以追踪宇宙中物质分布的性状(即暗物质的分布),以及光在宇宙中传播的几何路径的特性,对宇宙结构形成历史以及膨胀历史同时作出测量<sup>①</sup>。

3) **星系团计数** 从结构形成理论或数值模拟可以得到单位体积内宇宙星系团形成的个数,将它与宇宙学观测比较就可以得到强有力的宇宙学限制。在观测中,通过观测量 $O$ 来观测星系团,径向选择函数为 $f(O, z)$ ,则有

$$\frac{d^2 N(z)}{dz d\Omega} = \frac{r^2(z)}{H(z)} \int_0^\infty p(O|M, z) \frac{dn(z)}{dM} dM, \quad (29)$$

其中 $dn(z)/dM$ 为共动体积内暗物质晕的数密度,而 $p(O|M, z)$ 描述星系团与背后的暗物质晕质量红移分布的概率关系。

1.2.3 **未来观测** 下面列举几个未来主要的宇宙学观测项目<sup>[62]</sup>,它们均有可能与天琴合作开展引力波源寻找等研究:

1) Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)项目<sup>②</sup>是一个集成5 000根光纤的光谱仪,被安装在美国National Optical Astronomy Observatory的4 m Mayall望远镜上,将在5年内观测红移1.5内的4千万个星系的位置和红移。

2) Large Synoptic Survey Telescope (LSST)项目是一个8.4 m的光学波段地面望远镜<sup>[5-6]</sup>,坐落在智利的Cerro Pachon。10年的运行时间内观测约上百亿个星系和相同数量级的恒星。

3) Square Kilometer Array (SKA)是另一个国际合作的大型地面(射电)望远镜项目<sup>③</sup>,拥有一平方千米的望远镜接收面积和很宽的接收波段,借助中性氢21 cm的发射线观测高红移的星系。

4) WFIRST是一架2.4 m口径的近红外空间望远镜<sup>④</sup>,计划21世纪20年代中期发射升空并运行5年。

5) ESA主导的Euclid是一个口径1.2 m的柯

尔施望远镜<sup>⑤</sup>,工作在光学和近红外波段,通过5年的巡天观测,有望将暗能量状态方程参数 $w_0$ 和 $w_a$ 限制在2%和10%的精度。

6) International X-ray Observatory是一个X-ray波段的第四代项目<sup>⑥</sup>,焦距达到约12 m,拥有高精度的X-ray积分场单元(X-IFU)和大视场相机(WFI)两个设备。

7) 中国空间站望远镜(Chinese Space Station Telescope, CSST)是我国天文学界未来的旗舰级项目<sup>[63]</sup>。望远镜与中国载人空间站在同一轨道(高400 km)飞行,具有2 m口径,1.1 deg<sup>2</sup>视场,约0.15"空间分辨率,在255~1 000 nm范围内有7个光学波段和3个无缝光栅光谱波段,在10年内对17 500 deg<sup>2</sup>天区进行巡天观测,通过弱引力透镜、星系成团等方法对暗能量、暗物质、引力本质、大尺度结构等作出探测。

### 1.3 哈勃常数测量

哈勃常数可以通过在邻近宇宙搭建距离阶梯方法得到。目前人们对CMB的测量已经相当精确。Planck卫星科学工作组由此得了另一个 $H_0$ 的测量,相比临近宇宙的测量在很高置信度上偏低。随着数据规模和精度的提高,两种方法之间的差异持续加大,目前已达到4~5 $\sigma$ 置信度。

解决哈勃常数的争议问题已经成为目前宇宙学界最引人注目的问题之一。

1.3.1 **距离阶梯测量** 距离阶梯方法<sup>[64]</sup>的确立,最早是由于人们利用“造父变星”(Cepheid Variables)来测量银河系近邻星系(如麦哲伦云)的距离<sup>[65]</sup>。对更明亮Ia型超新星的测量可以把哈勃图一直测量到红移 $z \geq 1$ 。文献[66]利用哈勃空间望远镜这一利器,里程碑式地用造父变星测量得到了哈勃常数 $H_0 = (72 \pm 8) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 。目前该方法测得的哈勃常数最新数值为 $H_0 = (74.03 \pm 1.42) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ <sup>[67]</sup>。

1.3.2 **强引力透镜** 强引力透镜是另一个测量哈勃常数的独立方法(参见文献[68])。当光线从某一个遥远的背景天体(俗称“源”)发出,经过中间有质量的天体(俗称“透镜”)时,光线

①<http://www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHLS/>

②<https://desi.lbl.gov/>

③<http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>

④<http://www.skatelescope.org/>

⑤<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=102>

⑥<https://sci.esa.int/web/athena/-/59896-mission-summary>

由于引力作用的路径改变而分裂成几束, 形成多个像, 像之间的时间延迟 (Time Delay) 就可以被用来推断哈勃常数。设图像处于角度  $\theta = (\theta_1, \theta_2)$ , 与源的相对角距离为  $\beta = (\beta_1, \beta_2)$ , 那么时间延迟为

$$t(\theta, \beta) = \frac{D_{\Delta}}{c} \left[ \frac{(\theta - \beta)^2}{2} - \psi(\theta) \right], \quad (30)$$

这里  $D_{\Delta}$  被称为时间延迟距离 (time-delay distance),  $\psi(\theta)$  为透镜势。HOLiCOW 合作组<sup>[69-70]</sup>利用这一方法得到  $H_0 = 73.3^{+1.7}_{-1.8} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ , 与距离阶梯观测很好地一致, 与 Planck 的 CMB 结果则有  $5\sigma$  的差异。

**1.3.3 CMB 结果** CMB 光子从红移 1 100 处发射, 最终传播到观测者的阶段中, 会受到宇宙膨胀的影响。这使得我们可以从 CMB 结果中推测出哈勃参数的大小<sup>[71]</sup>。在假设  $\Lambda$ CDM 模型的前提下, 最新的 Planck 卫星观测得到了  $H_0 = (67.4 \pm 0.5) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ <sup>[72]</sup> 的限制结果。这一结果与距离阶梯测得的结果存在超过  $4\sigma$  的偏差。

相比距离阶梯方法, CMB 测量是一种间接的哈勃常数测量方法。但是它的理论诠释更加清楚, 因为 CMB 是由线性物理过程所主导的。

**1.3.4 逆距离阶梯方法** CMB 形成的重子声学振荡在之后的宇宙学大尺度结构分布中留下了非常重要的印记。我们可以取 CMB 形成的声学峰的大小作为一个标准, 与大尺度结构中的 BAO 对比, 发展出“逆向的”距离阶梯的方法<sup>[73]</sup>。最新的这一方法得到了  $H_0 = (67.8 \pm 1.3) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  的测量结果<sup>[74]</sup>, 与 CMB 的结果非常好地吻合。

**1.3.5 引力波标准汽笛** 致密双星系统可辐射出引力波, 其中携带了系统光度距离的信息。这使得我们得以在知道系统的红移的情况下, 对距离-红移关系作出测定。因此, 这样的引力波辐射系统被科学家们称为“标准汽笛”, 以类比光学上作为“标准烛光”测定距离的 Ia 型超新星。引力波标准汽笛有望在不远的未来成为探测宇宙膨胀历史的重要手段。

相比传统的 Ia 型超新星作为光学标准烛光测量距离的方法, 引力波标准汽笛测距具有一系列独特的优势。

1) 首先, 通过引力波源的波形信号我们可以直接计算出波源的光度距离; 而 Ia 型超新星则需要通过与其他近距离的测距方法相互比较来校正、确定 (即距离阶梯), 从而受到很多系统误差的

影响。

2) 其次, 引力波源的亮度几乎单纯地完全由系统的引力特性决定, 不存在 Ia 型超新星爆发机制受星体化学特性影响而造成的“烛光不一致”问题。

3) 最后, 尤其关键的是, 未来 LISA、天琴等空间引力波项目有望探测到宇宙早期大质量黑洞发出的引力波, 使得我们可以在  $1 < z < 10$  的高红移区间内测量宇宙距离。这一红移区间很难被目前电磁学窗口的宇宙学探测方法 (Ia 型超新星, BAO, CMB) 所覆盖。弥补这一空白使得我们可以前所未有地在极早期宇宙检验标准  $\Lambda$ CDM 宇宙学模型的预言, 以及限制和检验其他与标准模型在早期有偏离的理论模型 (如早期暗能量、相互作用暗能量、暗物质衰变、暗物质暗能量统一模型等)。

引力波标准汽笛最大的不足在于, 引力波无法独立完成距离-红移关系的测量。虽然它能够告诉我们距离的信息, 但所需要的红移信息必须通过其他天文学观测手段得到。一般地, 如果某些引力波事件在光学波段存在相对应的瞬变源 (如伽玛暴、射电喷流), 则可以通过测量电磁对应体或对其宿主星系的观测得到红移。如果我们无法确定引力波事件的电磁对应体, 其红移也可以通过在一定范围内所有可能的宿主星系红移的统计平均来估计。这种统计学红移确定方法对未来陆基引力波探测网有可能发挥很大作用, 因为很多探测到的信号是没有电磁对应体的双黑洞并合事件。

标准汽笛首次应用于宇宙学距离测量是对引力波事件 GW170817 在引力波窗口和电磁窗口的多信使测量 (参见文献 [75] 等)。2017 年 8 月 17 日, LIGO 与 VIRGO 探测器捕捉到来自双中子星并和的强烈引力波信号。双星并和后不到两秒, 在引力波源所在的天空区间内即观测到编号为 GRB 170817A 的伽玛暴事件。这一天区随后被大量光学天文仪器密集观测, 并在星系 NGC4993 发现了对应的光学瞬变源。这一系列多信使观测使得我们得以将 GW170817 作为标准汽笛来探测宇宙膨胀速率, 得到  $70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$  的测量结果。这一结果与目前 Planck 卫星 CMB 以及 Ia 型超新星观测结果在误差允许范围内互相一致。

随着未来引力波实验技术的发展, 标准汽笛作为独立的宇宙学探针, 将在很大的红移区间内

对距离-红移关系作出重要的探测结果,为宇宙学研究带来价值巨大的科学数据,并在天文学上与传统的标准烛光作交叉检验。一方面,未来的陆基引力波探测器将在 10~1 000 Hz 高频引力波区间得到较近距离宇宙的距离探测,预期在 2020/2026 年可对  $H_0$  作出 5%/1% 精度的探测。另一方面, LISA、天琴等空间引力波探测项目将通过大质量双黑洞并和事件、极端质量比并和事件等,在  $z = 1\sim 8$  的红移区间内测定距离-红移关系,对包括  $H_0$  在内的很多重要宇宙学参量作出强有力的探测。

#### 1.4 宇宙膨胀关键科学问题总结

下面就精确宇宙学参数测量、标准  $\Lambda$ CDM 模型的拓展、宇宙学探针的发展、引力波宇宙学几个方面,结合天琴的具体情况,总结了关于宇宙膨胀中的关键问题:

1) 需要精确测量宇宙学参数。这是研究一切宇宙学科学问题的前提<sup>[72, 76-77]</sup>。

2) 拓展 6 参数的标准  $\Lambda$ CDM 模型。目前不同的观测数据在基于基本  $\Lambda$ CDM 模型进行宇宙学参数推断时,已出现一些较为显著的不一致性<sup>[76-77]</sup>。宇宙学模型的扩展的问题与一系列基本科学问题息息相关,比如:宇宙的加速膨胀是源于暗能量的存在还是源于在宇宙尺度上引力理论偏离爱因斯坦广义相对论?暗能量是否有动力学?中微子的质量是多少,质量如何排序,是否只有三代中微子,有没有惰性中微子?原初引力波的幅度是多少?宇宙的第一缕曙光何时出现,宇宙再电离的历史是怎样的?等等。

3) 发展新的宇宙学探针。未来的 10~15 年是宇宙学研究的非常关键的阶段,多项大型地面观测项目(如 DESI、LSST 等)和空间观测项目(如 Euclid、WFIRST、CSST 等)将相继实施,将对宇宙学研究产生决定性影响。未来的宇宙学新探针可能包括射电 21 cm 观测和引力波观测。其中,平方公里阵列射电望远镜(SKA)<sup>[78]</sup>可以测量中性氢功率谱以及重子声波振荡和红移空间畸变,其精度可达到或超过大型光学巡天项目。另一方面,引力波观测也将在宇宙学研究中发挥重要作用。引力波振幅携带了光度距离的信息,因此通过致密双星并合产生的引力波的波形的观测可以独立测量引力波爆发源的光度距离<sup>[79]</sup>。未来的引力波项目(爱因斯坦望远镜<sup>[80]</sup>、LISA<sup>[81]</sup>、太极<sup>[82]</sup>、天琴<sup>[83]</sup>等)必将观测到大量的引力波事件,因此必然会把引力波观测发展成宇宙学新探针,为宇

宙学参数精确测量提供重要帮助<sup>[84-85]</sup>。

## 2 天琴对宇宙膨胀的探测能力评估

### 2.1 空间引力波项目对于探测宇宙膨胀的意义

空间引力波计划被提出用以探测频率较低的引力波(频率在  $10^{-4}\sim 1$  Hz 的范围)。目前发展较为成熟的是 LISA 计划,预计将在 2034 年左右发射。我国提出了天琴计划和太极计划,目前也在顺利实施中,预计也将在 2030 年左右发射。

空间引力波天文台的观测对象主要包括大质量双黑洞并合、极端质量比旋进、宇宙弦的引力辐射、早期宇宙相变的引力辐射等,与宇宙学参数测量研究相关的观测主要是大质量双黑洞的并合。目前对大质量双黑洞并合事件的发生率的估算还有较大不确定性,因为其中涉及很多复杂的物理过程。对于大质量黑洞的形成,通常考虑三种不同的模型,即“轻种子”模型(pop III 模型)、有时间延迟效应的“重种子”模型(Q3d 模型)、忽略延迟效应的“重种子”模型(Q3nod 模型)。对于这些模型,未来的空间探测器预计都可以在几年内探测到几十个乃至数百个并合事件。类似于 aLIGO 的地面探测器探测到的双中子星并合事件主要集中于低红移区域,而对于高红移区域,则需要天琴等空间引力波探测器来对大质量双黑洞并合事件进行探测。高红移数据对于研究暗能量的演化十分重要,同时也可以作为对低红移数据的补充与检验。

大质量双黑洞并合有时会伴随强烈的电磁爆发,因此预期也存在电磁对应体,在红移相对较低且探测器分辨率足够(在  $10\text{ deg}^2$  以内)的情况下可结合 LSST、SKA 等项目获得电磁对应体并确定红移。由于此类波源数目较少,往往只有几十个甚至更少,而且考虑到弱引力透镜效应带来的较大误差,空间引力波观测对宇宙学参数限制的能力应该是较弱的。尽管如此,研究空间引力波观测对暗能量宇宙学的限制也是意义重大的。空间引力波计划是多科学目标的计划,宇宙学研究是所有空间引力波计划的重要研究目标之一。尽管此类引力波单独作为宇宙学探针的限制能力有限,但是由于引力波观测可独立测量绝对距离,其打破电磁观测带来的参数简并的能力是较强的,因此有必要研究引力波与其他观测的联合限制,研究空间引力波观测如何打破宇宙学参数简并,进而提升宇宙学参数的限制精度。

## 2.2 天琴对于宇宙膨胀的探测能力

天琴对宇宙膨胀的探测能力在文献 [86] 中做了详细的分析讨论。以下, 我们主要介绍该文献的科学结果。

在文献 [86] 中, 我们根据文献 [87-88] 中所提供的设计指标, 对于天琴在限制宇宙学参数方面的能力进行了评估。出于乐观估计的目的, 我们所考虑的天琴配置为双星座构型 (Twin Constellations) 方案。作为初步研究, 我们只考虑了  $\Lambda$ CDM 和  $w$ CDM 两种宇宙学模型作为基准模型。基于宇宙学基准模型和天琴的设计指标, 我们模拟了天琴在 5 年工作时间内所观测到的标准汽笛数据。图 1 给出了以  $\Lambda$ CDM 模型为基准模型所模拟得到的标准汽笛数据。其中 pop III、Q3nod 和 Q3d 分别代表三种大质量双黑洞 (MBHB) 模型, 三种模型所对应的可观测到的标准汽笛数目分别为 12、27 和 14 个。

图 2 给出了单独使用天琴的模拟数据时, 对于宇宙学参数进行限制的结果。从图中可以看出, 无论是对于  $\Lambda$ CDM 模型还是  $w$ CDM 模型, Q3nod 相比于另两种 MBHB 模型都可以给出更好的限制结果, 而另两种模型则呈现出相近的限制精度。这是因为不同 MBHB 模型所预测的标准汽笛事件数不同, Q3nod 的数目为 27 个, 而另两种分别为 12 和 14 个, Q3nod 所对应的标准汽笛数量要明显高于另外两种 MBHB 模型。在  $\Lambda$ CDM 模型中,  $\Omega_m$  和  $H_0$  的限制精度为  $\varepsilon(\Omega_m)=6.58\%$  和  $\varepsilon(H_0)=1.13\%$ ; 在

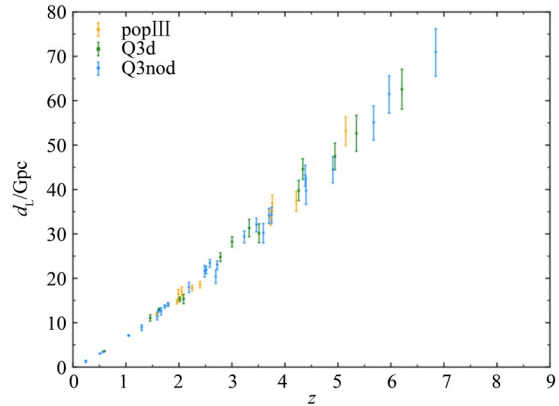


图 1 基于  $\Lambda$ CDM 模型及天琴 5 年观测时间, 模拟得到的标准汽笛数据 [86-88]

Fig. 1 Simulated standard siren data from TianQin 5-year observations, based on  $\Lambda$ CDM model [86-88]

$w$ CDM 模型中,  $w$  的限制精度为  $\varepsilon(w)=20.64\%$ 。

为了研究天琴在打破参数简并方面的能力, 我们在图 3 中给出了使用 CMB 数据 (Planck 2018) 和天琴模拟数据所得到的限制结果。对于  $\Lambda$ CDM 和  $w$ CDM 两种宇宙学模型, 天琴都能在一定程度上打破 CMB 数据限制下参数之间的简并, 尤其对于  $w$ CDM 模型, 这种打破简并的效果最为明显。举例来讲, 对于  $w$ CDM 模型, 天琴数据的加入可以使得对于参数  $\Omega_m$ 、 $H_0$  和  $w$  的限制精度分别提高 90%、90%、85%。由此可以看出在宇宙学参数估计方面, 天琴作为宇宙晚期重要的宇宙学探针, 在打破电磁观测带来的参数简并方面具有巨大潜力。

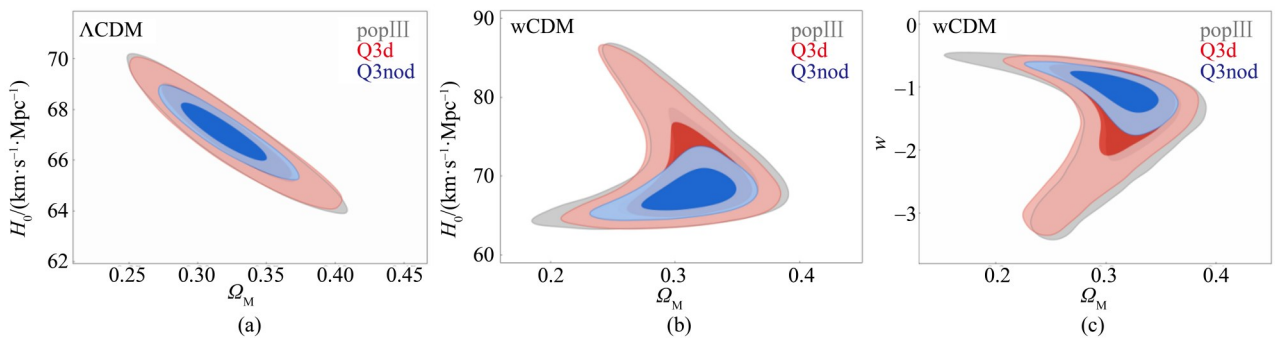


图 2 在  $\Lambda$ CDM 和  $w$ CDM 模型下, 单独使用天琴模拟数据对于宇宙学参数的限制结果 [86-88]

Fig. 2 The constraints on cosmological parameters by using the TianQin mock data alone, in the  $\Lambda$ CDM and  $w$ CDM models [86-88]

由于天琴在未来可以和其他重要观测项目的数据相结合, 共同对宇宙学参数进行限制。所以我们也评估了天琴在现有观测项目的基础上, 进一步提高参数限制精度的能力。这里我们考虑了当前几种主流的观测数据作为对比, 即 CMB、BAO 和 SN。图 4 给出了限制结果, 通过对比可以

看出天琴的确可以在一定程度上提高当前观测项目的限制能力。相比较于仅使用 CMB+BAO+SN 数据而言, 天琴模拟数据的加入可以使得对于参数  $\Omega_m$  和  $H_0$  的限制精度分别提高 22% 和 24% (在  $\Lambda$ CDM 模型中); 而对于参数  $w$  的限制精度可以提高 20% (在  $w$ CDM 模型中)。需要指出, 以上分析基于有电

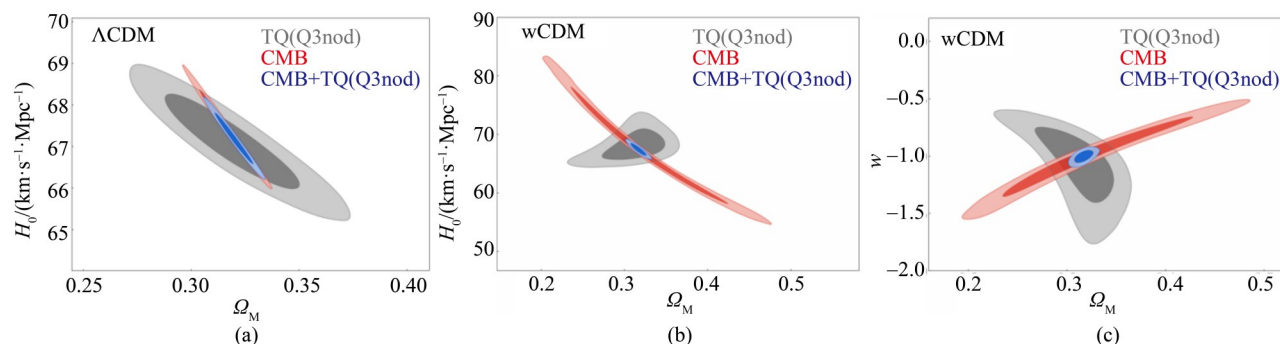


图3 在 $\Lambda$ CDM和wCDM模型下,使用天琴和CMB的数据组合对于宇宙学参数的限制结果<sup>[86-88]</sup>

Fig. 3 The constraints on cosmological parameters by using the combination of TianQin mock data and CMB data, in the  $\Lambda$ CDM and wCDM models<sup>[86-88]</sup>

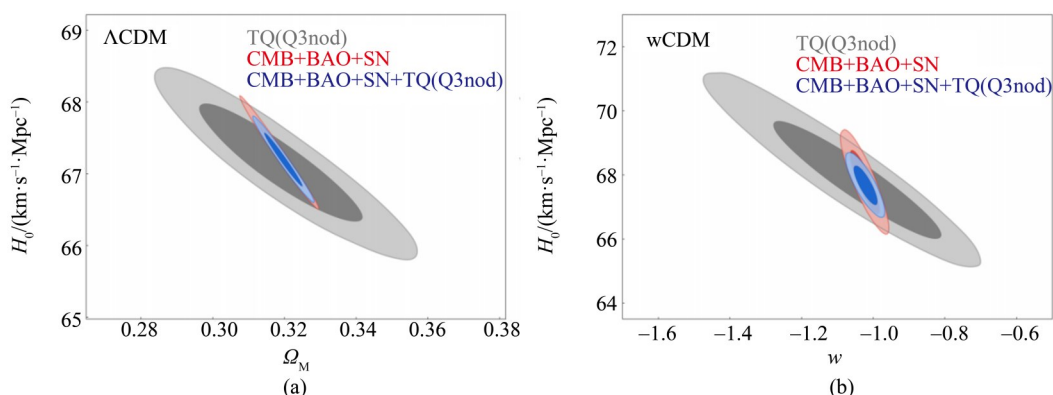


图4 在 $\Lambda$ CDM和wCDM模型下,利用天琴和CMB+BAO+SN的数据组合对参数限制结果的对比图<sup>[86-88]</sup>

Fig. 4 The constraints on cosmological parameters by using the combination of TianQin mock data and CMB+BAO+SN data, in the  $\Lambda$ CDM and wCDM models<sup>[86-88]</sup>

磁对应体的引力波事件,而对于无电磁对应体的引力波事件,可以在大尺度巡天数据中搜寻相关的可能宿主星系,并做出宇宙学限制。

天琴对于大质量双黑洞并合事件的探测有助于打破其他观测手段所导致的宇宙学参数简并,从而提升宇宙学参数的测量精度,同时,高红移数据也有助于更好地研究暗能量的演化,这是区别于其他众多观测的巨大优势。未来天琴将为引力波标准汽笛观测提供重要数据,这些数据将促使标准汽笛观测发展为一种重要的宇宙学探针。未来的标准汽笛观测与光学和射电观测相结合将把宇宙膨胀历史的探索推进至一个全新的层面,为揭示暗能量的本质属性提供帮助。

### 3 总结

宇宙膨胀历史的测定是现代宇宙学中最为核心的课题之一。在基础物理上,对宇宙膨胀历史精确测量,将有助于我们理解暗能量与暗物质的本质,了解在宇宙尺度上是否需要修改引力、以

及它的具体形式,等等一系列重大问题。很多人认为,在理论上完全解决这些问题也许会带来基础物理学的又一次大革命。

目前限于观测实验的精度,我们对暗能量性质测定的精度仍然差强人意。下一代DESI、LSST、EUCLID、WFIRST等众多大型实验将使用Ia型超新星、重子声学振荡、弱引力透镜、星系团计数等方法对宇宙膨胀历史作出更加精确的测量。或许它们能对暗能量是否是宇宙学常数这一问题作出回答。

作为描述宇宙膨胀速率的最基本参数,哈勃常数 $H_0$ 的测量至今仍然存在问题。在邻近宇宙搭建距离阶梯的方法测得的结果与从CMB观测推出的数值有接近 $5\sigma$ 的巨大差异。这一差异有可能是某一种观测手段的系统误差导致,也可能是从CMB推断 $H_0$ 时假设的 $\Lambda$ CDM模型不正确所致。如果是后者导致将会更加有趣,这意味着宇宙仍存在我们知道的秘密。

总之,宇宙膨胀的这些问题都与引力波实验

密切相关。最直接地, 未来引力波实验的标准汽笛方法可以给出独立的  $H_0$  的测量。如果数据足够多, 引力波标准汽笛还将对暗能量状态方程与比例、暗物质比例、空间曲率等参数作出限制。此外, 很多未来宇宙学巡天实验也与未来引力波实

验存在很多可合作的方向。诸如 LSST 这样的巡天实验能发现很多瞬变源, 为寻找引力波信号电磁对应体提供帮助; 在没有电磁信号的情况下, 巡天实验将提供大尺度上星系的分布, 也将为人们寻找引力波信号的对应天体提供数据库。

#### 参考文献:

- [1] HUBBLE E. A relation between distance and radial velocity among extragalactic nebulae [J]. *Proc Nat Acad Sci*, 1929, 15: 168–173.
- [2] ALPHER R A, BETHE H, GAMOW G. The origin of chemical elements [J]. *Phys Rev*, 1948, 73 (7): 803–804.
- [3] ALPHER R A, HERMAN R C. Remarks on the evolution of the expanding Universe [J]. *Phys Rev*, 1949, 75 (7): 1089–1095.
- [4] ADE P A R, AGHANIM N, ARNAUD M, et al. Planck 2015 results. VIII. Cosmological parameters [J]. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A13.
- [5] RIESS A G, FILIPPENKO A V, CHALLIS P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant [J]. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038.
- [6] PERLMUTTER S, ALDERING G, GOLDHABER G, et al. Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high redshift supernovae [J]. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586.
- [7] WEINBERG S. The cosmological constant problem [J]. *Rev Mod Phys*, 1988, 61: 1–23.
- [8] LI M, LI X D, WANG S, et al. Dark energy [J]. *Commun Theor Phys*, 2011, 56: 525–604.
- [9] WETTERICH C. Cosmology and the fate of dilatation symmetry [J]. *Nucl Phys*, 1988, B302: 668–696.
- [10] ZLATEV I, WANG L M, STEINHARDT P J. Quintessence, cosmic coincidence, and the cosmological constant [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 82: 896–899.
- [11] CALDWELL R R. A phantom menace? [J]. *Phys Lett*, 2002, B545: 23–29.
- [12] CLINE J M, JEON S, MOORE G D. The phantom menaced: Constraints on low-energy effective ghosts [J]. *Phys Rev*, 2004, D70: 043543.
- [13] GARRIGA J, VILENKIN A. Living with ghosts in Lorentz invariant theories [J]. *JCAP*, 2013, 1301: 036.
- [14] CAI Y F, SARIDAKIS E N, SETARE M R, et al. Quintom cosmology: Theoretical implications and observations [J]. *Physics Reports*, 2010, 493: 1–60.
- [15] CHIBA T, OKABE T, YAMAGUCHI M. Kinetically driven quintessence [J]. *Phys Rev*, 2000, D62: 023511.
- [16] ARMENDARIZ-PICON C, MUKHANOV V F, STEINHARDT P J. A dynamical solution to the problem of a small cosmological constant and late time cosmic acceleration [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 4438–4441.
- [17] ARMENDARIZ-PICON C, MUKHANOV V F, STEINHARDT P J. Essentials of k-essence [J]. *Phys Rev*, 2001, D63: 103510.
- [18] ARKANI-HAMED N, CHENG H C, LUTY M A, et al. Ghost condensation and a consistent infrared modification of gravity [J]. *JHEP*, 2004, 5: 074.
- [19] PIAZZA F, TSUJIKAWA S. Dilatonic ghost condensate as dark energy [J]. *JCAP*, 2004, 0407: 004.
- [20] DEFFAYET C, PUJOLAS O, SAWICKI I, et al. Imperfect dark energy from kinetic gravity braiding [J]. *JCAP*, 2010, 1010: 026.
- [21] PUJOLAS O, SAWICKI I, VIKMAN A. The imperfect fluid behind kinetic gravity braiding [J]. *JHEP*, 2011, 11: 156.
- [22] NICOLIS A, RATAZZI R, TRINCHERINI E. The Galileon as a local modification of gravity [J]. *Phys Rev*, 2009, D79: 064036.
- [23] KOBAYASHI T, YAMAGUCHI M, YOKOYAMA J. G-inflation: Inflation driven by the Galileon field [J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 231302.
- [24] RIBAS M O, DEVECCHI F P, KREMER G M. Fermions as sources of accelerated regimes in cosmology [J]. *Phys Rev*, 2005, D72: 123502.
- [25] CAI Y F, WANG J. Dark energy model with spinor matter and its quintom scenario [J]. *Class Quant Grav*, 2008, 25: 165014.
- [26] YAJNIK U A. Dark energy from ferromagnetic condensation of cosmic magninos [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1102.2562>.
- [27] TSYBA P, YERZHANOV K, ESMAKHANOVA K, et al. Reconstruction of f-essence and fermionic Chaplygin gas models of dark energy [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1103.5918>.
- [28] ARMENDARIZ-PICON C. Could dark energy be vector-like? [J]. *JCAP*, 2004, 0407: 007.
- [29] ZHAO W, ZHANG Y. The state equation of the Yang-

- Mills field dark energy models[J]. *Class Quant Grav*, 2006, 23: 3405–3418.
- [30] GUPTA P D. Dark energy and Chern–Simons like gravity from a dynamical four–form[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/0905.1621>.
- [31] ABRAMO L R , WOODARD R P. A scalar measure of the local expansion rate [J]. *Phys Rev*, 2002, D65: 043507.
- [32] KAMENSHCHIK A Y, MOSCHELLA U, PASQUIER V. An alternative to quintessence [J]. *Phys Lett*, 2001, B511: 265–268.
- [33] BILIC N, TUPPER G B, VIOLLIER R D. Unification of dark matter and dark energy: The inhomogeneous chaplygin gas [J]. *Phys Lett*, 2002, B535: 17–21.
- [34] BENTO M C, BERTOLAMI O, SEN A A. Generalized Chaplygin gas, accelerated expansion and dark energy matter unification [J]. *Phys Rev*, 2002, D66: 043507.
- [35] LI M. A model of holographic dark energy[J]. *Physics Letters B*, 2004, 603(1/2): 1–5.
- [36] CHEVALLIER M, POLARSKI D. Accelerating universes with scaling dark matter [J]. *Int J Mod Phys*, 2001, D10: 213–224.
- [37] LINDER E V. Exploring the expansion history of the universe[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 091301.
- [38] HUTERER D, TURNER M S. Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements [J]. *Phys Rev*, 1999, D60: 081301.
- [39] JASSAL H K , BAGLA J S, PADMANABHAN T. WMAP constraints on low redshift evolution of dark energy [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 356: L11–L16.
- [40] BUCHDAHL H A. Non–linear lagrangians and cosmological theory [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1970, 150: 1.
- [41] CARROLL S M, DUVVURI V, TRODDEN M, et al. Is cosmic speed–up due to new gravitational physics? [J]. *Phys Rev*, 1970, D70: 043528.
- [42] SOTIRIOU T P, FARAONI V.  $f(R)$  theories of gravity [J]. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 451–497.
- [43] de FELICE A, TSUJIKAWA S.  $f(R)$  theories [J]. *Living Rev Rel*, 2010, 13: 3.
- [44] MILGROM M. A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis [J]. *Astrophys J*, 1983, 270: 365–370.
- [45] BEKENSTEIN J D. Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm [J]. *Phys Rev*, 2004, D70: 083509.
- [46] DVALI G R, GABADADZE G, PORRATI M. 4–D gravity on a brane in 5–D Minkowski space [J]. *Phys Lett*, 2000, B485: 208–214.
- [47] BRANS C, DICKE R H. Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation [J]. *Phys Rev*, 1961, 124 (3): 925–935.
- [48] AMENDOLA L. Scaling solutions in general nonminimal coupling theories [J]. *Phys Rev*, 1999, D60: 043501.
- [49] ZWIEBACH B. Curvature squared terms and string theories [J]. *Phys Lett*, 1985, 156B: 315–317.
- [50] NOJIRI S, ODINTSOV S D, SASAKI M. Gauss–Bonnet dark energy [J]. *Phys Rev*, 2005, D71: 123509.
- [51] LOVELOCK D. The Einstein tensor and its generalizations [J]. *J Math Phys*, 1971, 12: 498–501.
- [52] HORAVA P. Quantum gravity at a lifshitz point [J]. *Phys Rev*, 2009, D79: 084008.
- [53] BENGOCHEA G R, FERRARO R. Dark torsion as the cosmic speed–up [J]. *Phys Rev*, 2009, D79: 124019.
- [54] LINDER E V. Einstein’s other gravity and the acceleration of the Universe [J]. *Phys Rev*, 2010, D81: 127301.
- [55] MANNHEIM P D. Alternatives to dark matter and dark energy [J]. *Prog Part Nucl Phys*, 2006, 56: 340–445.
- [56] WEINBERG D H, MORTONSON M J, EISENSTEIN D J, et al. Observational probes of cosmic acceleration [J]. *Phys Rept*, 2013, 530: 87–255.
- [57] COLLESS M, PETERSON B, JACKSON C, et al. The 2dF galaxy redshift survey: Final data release (2003) [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/0306581>.
- [58] YORK D G. The Sloan digital sky survey: Technical summary [J]. *Astron J*, 2000, 120: 1579–1587.
- [59] BEUTLER F, BLAKE C, COLLESS M, et al. The 6dF galaxy survey: Baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 416: 3017–3032.
- [60] DRINKWATER M J, JUREK R J, BLAKE C, et al. The wiggles dark energy survey: Survey design and first data release [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 401: 1429–1452.
- [61] GONG Y, LIU X, CAO Y, et al. Cosmology from the Chinese Space Station Optical Survey (CSS–OS) [J]. *Astrophys J*, 2019, 883: 203.
- [62] FREEDMAN W L, MADORE B F. The Hubble constant [J]. *Ann Rev Astron Astrophys*, 2010, 48: 673–710.
- [63] FRIEMAN J, TURNER M, HUTERER D. Dark energy and the accelerating Universe [J]. *Ann Rev Astron Astrophys*, 2008, 46: 385–432.
- [64] LEAVITT H S. 1777 variables in the Magellanic Clouds [J]. *Harvard Obs Annals*, 1908, 60: 87–108.

- [65] FREEDMAN W L, MADORE B F, HATT D, et al. The Carnegie–Chicago Hubble program. VIII. an independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 882: 34.
- [66] RIESS A G, CASERTANO S, YUAN W, et al. Large Magellanic Cloud cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond  $\Lambda$ CDM [J]. *Astrophys J*, 2019, 876: 85.
- [67] TREU T, MARSHALL P J. Time delay cosmography [J]. *Astron Astrophys Rev*, 2016, 24: 11.
- [68] SUYU S H, BONVIN V, COURBIN F, et al. HOLICOW =e.  $H_0$  Lenses in COSMOGRAIL’s Wellspring: program overview [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017: 468: 2590–2604.
- [69] WONG K C, SUYU S H, CHEN G C F, et al. HOLICOW XIII. A 2.4% measurement of  $H_0$  from lensed quasars: 5.  $3\sigma$  tension between early and late–Universe probes [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 498: 1.
- [70] HINSHAW G, LARSON D, KOMATSU E, et al. Nine–year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological parameter results [J]. *Astrophys J Suppl*, 2013, 208: 19.
- [71] AGHANIM N, AGHANIM N, AKRAMI Y, et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters [J]. *Astron Astrophys*, 2020, 641: A6.
- [72] AUBOURG R, BAILEY S, BAUTISTA J E, et al. Cosmological implications of baryon acoustic oscillation measurements [J]. *Phys Rev*, 2015, D92: 123516.
- [73] MACAULAY E, NICHOL R C, BACON D, et al. First cosmological results using type Ia supernovae from the dark energy survey: Measurement of the Hubble constant [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 486: 2184–2196.
- [74] ABBOTT B P, ABBOTT D, ACERNESE F, et al. A gravitational–wave standard siren measurement of the Hubble constant [J]. *Nature*, 2017, 551: 85–88.
- [75] ADE P A R, AGHANIM N, ARMITAGE–CAPLAN C, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters [J]. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A16.
- [76] ADE P A R, AGHANIM N, ARMITAGE–CAPLAN C, et al. Planck 2015 results. VIII. Cosmological parameters [J]. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A13.
- [77] BACON D J, BATTYE R A, BULL P, et al. Cosmology with phase 1 of the square kilometer array: Red Book 2018: Technical specifications and performance forecasts [J]. *Pub Astron Soc Austral*, 2018, 37: e007.
- [78] SCHUTZ B F. Determining the Hubble constant from gravitational wave observations [J]. *Nature*, 1986, 323: 310–311.
- [79] SATHYAPRAKASH B, ABERNATHY M, ACERNESE F, et al. Scientific potential of Einstein Telescope [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1108.1423>.
- [80] SEOANE P A, AOUDIA S, AUDLEY H, et al. The gravitational universe [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1305.5720>.
- [81] HU W R, WU Y L. The Taiji Program in Space for gravitational wave physics and the nature of gravity [J]. *Nat Sci Rev*, 2017, 4: 685–686.
- [82] LUO J, CHEN L S, DUAN H Z, et al. TianQin: a space–borne gravitational wave detector [J]. *Class Quant Grav*, 2016, 33: 035010.
- [83] ZHANG X N, WANG L F, ZHANG J F, et al. Improving cosmological parameter estimation with the future gravitational–wave standard siren observation from the Einstein Telescope [J]. *Phys Rev*, 2019, D99: 063510.
- [84] WANG L F, ZHANG X N, ZHANG J F, et al. Impacts of gravitational–wave standard siren observation of the Einstein Telescope on weighing neutrinos in cosmology [J]. *Phys Lett*, 2018, B782: 87–93.
- [85] 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 [EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/1907.01838>.
- [86] FENG W F, WANG H T, HU X C, et al. Preliminary study on parameter estimation accuracy of supermassive black hole binary inspirals for TianQin [J]. *Phys Rev*, 2019, D99: 123002.
- [87] WANG H T, JINAG Z, SESANA A, et al. Science with the TianQin observatory: Preliminary results on massive black hole binaries [J]. *Phys Rev*, 2019, D100: 043003.

(责任编辑 张冰)