星系红移巡天宇宙学——探索暗能量

王钰婷¹, 赵公博^{1,2*}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: gbzhao@nao.cas.cn

2021-01-17 收稿, 2021-02-03 修回, 2021-02-05 接受, 2021-02-07 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2018YFA0404503)、国家杰出青年科学基金(11925303)和国家自然科学基金(11720101004, 11673025, 11890691)资助

摘要 宇宙时空的加速膨胀是20世纪自然科学最伟大的发现之一, 探索其背后的物理机制是当前物理学和天文学的关键科学任务. 在此研究领域, 亟待解决的问题包括: (1) 如何从海量观测数据中提取暗能量相关的核心信息? (2) 暗能量是否具有动力学性质? (3) 暗能量的本质是什么? 暗能量研究的主要方法是联合多种探测手段, 通过精准测量宇宙的膨胀率和结构形成来获取暗能量性质. 大型星系红移巡天为暗能量研究提供了关键的数据支持. 我们从巡天样本中提取重子声波振荡(baryon acoustic oscillations, BAO)和红移空间畸变(redshift space distortions, RSD)等重要的宇宙学探针, 分别用于测量宇宙的膨胀率和结构增长率, 开展暗能量研究. 大型巡天项目斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)已成功获取了百万量级的高质量星系光谱, 测绘了迄今为止最大的宇宙三维图像, 并将宇宙距离测量精度提高到1%, 在高精度暗能量检验中发挥至关重要的作用. 本文主要介绍过去10年内国际上最大的星系红移巡天项目——SDSS三期的重子振荡光谱巡天(Baryon Oscillation Spectroscopic Survey, BOSS, 2009~2014年)和四期的拓展重子振荡光谱巡天(extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey, eBOSS, 2014~2019年), 以及我们依托BOSS和eBOSS巡天开展暗能量研究方面的最新进展.

关键词 星系巡天, 重子声波振荡, 红移空间畸变, 宇宙膨胀率, 宇宙结构增长率, 暗能量

1998年, 通过对超新星的观测, 国际上两个研究小组独立发现了宇宙加速膨胀现象^[1,2]. 2011年, 诺贝尔物理学奖授予最早揭示这一重大发现的三位天体物理学家. 理论方面, 宇宙加速膨胀可以通过两大类机制来实现: 一是引入一种具有负压的新能量组分, 即暗能量; 二是在宇宙学尺度修正爱因斯坦引力. 观测方面, 在过去20多年里, 以探索宇宙加速膨胀机制为核心科学目标的观测技术快速发展, 包括Ia型超新星、宇宙微波背景辐射、宇宙大尺度结构等. 这些“宇宙学探针”是揭示宇宙加速膨胀机制的关键手段.

大规模星系红移巡天是探索宇宙加速膨胀的独立

观测手段之一. 巡天数据与低红移的超新星观测和早期宇宙微波背景辐射观测($z \sim 1100$)形成优势互补, 在揭示宇宙加速膨胀机制方面发挥重要作用. 依托星系红移巡天, 通过对宇宙中大量星系的光谱观测, 我们可以精确刻画宇宙中星系的三维空间分布, 从中提取重要的“宇宙学探针”, 进而开展暗能量性质和修正引力检验等宇宙学应用研究^[3]. 具体地, 从巡天的星系大样本中, 我们既可以通过重子声波振荡(baryon acoustic oscillations, BAO)测量宇宙的膨胀历史, 也可以通过红移空间畸变(redshift space distortions, RSD)测量宇宙结构增长率. BAO是早期宇宙中的光子-重子复合流体在重

引用格式: 王钰婷, 赵公博. 星系红移巡天宇宙学——探索暗能量. 科学通报, 2021, 66: 1336–1345

Wang Y T, Zhao G B. Cosmology with galaxy redshift surveys: Probing dark energy (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1336–1345, doi: [10.1360/TB-2021-0071](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0071)

子物质的引力和光子的压强两种反作用下产生的声波振荡,并随着宇宙的膨胀向外传播.随着光子从复合流体中的退耦,声波振荡终止,其传播距离便“冻结”在一个固定的特征尺度上,即声速视界 r_d ,也称为“宇宙标准尺”.沿视线方向测量BAO特征尺度可以测定哈勃参数 $H(z)$,垂直视线方向的测量可以测定角直径距离 $D_A(z) = \frac{c}{(1+z)} \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$. $H(z)$ 和 $D_A(z)$ 的理论值都与暗能量性质有关.因此,我们可以通过BAO来检验暗能量性质. BAO的产生机制清晰,信号集中在线性尺度上,避免了来自小尺度的系统误差影响^[4,5]. BAO是研究暗能量性质的有力观测手段. RSD效应由星系的本动造成. 巡天观测的星系红移除了宇宙学红移,还附加了星系本动速度造成的多普勒红移,使得星系三维空间分布在沿视线方向表现出被“挤压”(squashing)的特征,即Kaiser效应^[6]. 被挤压的程度与本动速度场强度有关. 基于线性扰动理论,本动速度与局域的密度涨落的对应关系为 $v \propto aHf\delta_m$ ^[7],其中 $f=d(\ln D)/d(\ln a)$ 表征宇宙结构的生长率, D 是增长因子, a 是尺度因子.在线性尺度上,本动速度的大小反映了宇宙结构增长的快慢.不同的暗能量和修正引力模型预言不同的宇宙大尺度结构形成率.因此,我们可以通过RSD测量提取宇宙结构增长的信息,进而用于暗能量和修正引力检验.

目前,国际上已经成功开展过多个大规模星系红移巡天项目,包括2度视场星系红移巡天(two-degree-Field Galaxy Redshift Survey, 2dFGRS)、WiggleZ巡天、6度视场星系巡天(six-degree-Field Galaxy Survey, 6dFGS)、斯隆数字巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)一期到四期.这些巡天项目不仅逐步拓展了人们对宇宙大尺度结构的认识,也推动了星系巡天宇宙学的蓬勃发展.2001年,2dFGRS国际合作组从14万星系大样本中成功提取了RSD信号,首次精确测量了红移畸变参数 $\beta=f/b=0.43 \pm 0.07$ ^[8],其表征了星系成团性在沿视线方向被挤压的程度,其中 b 为偏置因子,用来表示星系分布和宇宙物质分布之间的偏离;2005年,2dFGRS合作组发布了BAO测量和宇宙学结果:通过对22万低红移($z < 0.3$)星系样本的功率谱分析,合作组发现重子物质与宇宙物质的比例为 $\Omega_b/\Omega_m=0.185 \pm 0.046$ ^[9].与此同时,SDSS合作组利用约5万颗亮红星系,首次在红移0.16~0.47范围内,在3.4个标准差水平上探测到BAO信号^[10].后续的SDSS三期BOSS项目和四期eBOSS项目扩大了巡天面积,提高了巡天深度.此高红

移的BAO和RSD测量与低红移的观测形成互补.最终,历时20年的SDSS巡天完成了红移2.5以下的宇宙膨胀历史和结构增长历史的重建.

BAO和RSD是研究暗能量性质的重要探针.近期,我们利用最新的BAO测量检验宇宙学常数模型,在11个标准差水平证实了暗能量的存在,这是目前利用星系巡天得到的最强观测证据^[11,12].不同宇宙红移处的BAO测量有助于破除核心宇宙学参数之间的简并^[13].基于BOSS数据的高精度大尺度结构测量在宇宙学参数检验方面发挥了重要作用^[14~17].利用BAO和RSD测量,并结合超新星、宇宙微波背景辐射、引力透镜等观测数据,我们首次在3.5个标准差水平上发现了动力学暗能量的观测证据^[18].未来5年,第四代巡天将进一步提高BAO和RSD的测量精度^[19],将有望在5个标准差以上水平认证暗能量动力学性质,对揭示宇宙加速膨胀机制具有重要意义.

本文将介绍我们依托国际大规模星系巡天BOSS和eBOSS,在BAO和RSD测量、暗能量性质研究方面的最新进展.

1 BAO和RSD测量

1.1 BOSS和eBOSS测绘最大的宇宙三维图像

过去10年中,国际上最大规模的星系红移巡天项目是斯隆数字巡天.利用位于美国新墨西哥州阿帕奇山顶天文台(Apache Point Observatory)的2.5 m口径光学望远镜,SDSS合作组成功观测了百万量级星系光谱,具体包括SDSS三期(SDSS-III)的重子振荡光谱巡天项目(BOSS, 2009~2014年)^[20]和四期(SDSS-IV)的拓展重子振荡光谱巡天项目(eBOSS, 2014~2019年)^[21].这两个项目的主要科学目标就是通过分析大样本星系的三维空间分布,提取高精度的BAO和RSD信号,开展暗能量性质研究.

为期5年的BOSS巡天在10000平方度天区范围内,完成了i波段视星等大于19.9 mag、红移小于0.75、约150万条亮红星系的光谱观测,以及g波段视星等大于22 mag、红移大于2.1、16万条高红移类星体的莱曼阿尔法线丛(Lyman- α forest)观测(类星体的莱曼阿尔法线丛对应的是从遥远类星体到观测者之间的中性氢气体在类星体光谱上留下的一系列吸收线.通过对大量背景类星体的光谱观测,我们可以获得中性氢的三维分布,得到宇宙中物质的成团性信息)(图1(a)).

BOSS巡天结束后,在巡天覆盖体积上留下了一个观测空白区域(图1(a)).2014年,它的升级版eBOSS项目开始观测,以填补BOSS在巡天体积上的空白.eBOSS实现了更高红移($0.6 < z < 2.2$)的多源目标光谱观测,具体包括:(1)4103平方度巡天面积,红移 $0.6 < z < 1.0$ 范围内的174816颗亮红星系;(2)1170平方度巡天面积,红移 $0.6 < z < 1.1$ 范围内的173736颗发射线星系,这是SDSS 20年观测中首次使用蓝星系探测宇宙物质的大尺度结构分布,也是第四代巡天的主要示踪天体;(3)4699平方度巡天面积,红移 $0.8 < z < 2.2$ 范围内的343708颗成团性类星体;(4)延续了来自高红移类星体的莱曼阿尔法线丛观测,把红移2.1以上的样本数目扩增到210000(图1(b)).

1.2 两点统计分析

从大样本数据中提取宇宙学信息的常用方法是两点统计分析,即关联函数和功率谱.两点关联函数是物质密度涨落 $\delta(\mathbf{x})$ 在空间各点的系综平均,即 $\xi(\mathbf{r}) = \langle \delta(\mathbf{x})\delta(\mathbf{x}+\mathbf{r}) \rangle$,量化一定尺度上的星系成团性.在实际分析中,通常采用对比观测样本和随机样本来计算^[22].对于两类示踪天体A和B:

$$\xi_{AB}(\mathbf{r}) = \frac{D_A D_B - D_A R_B - D_B R_A + R_A R_B}{R_A R_B}, \quad (1)$$

其中,DD和RR分别表示观测样本和随机样本中相距为

r 的星系对数目,DR是来自观测样本和随机样本的交叉星系对数目.当A=B时,式(1)可回到单一示踪天体的两点关联函数.

通过对物质密度涨落进行傅立叶变换 $\delta(\mathbf{k}) = \int \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})\delta(\mathbf{r})$,也可以在傅立叶空间研究星系的成团性,即计算功率谱 $P(\mathbf{k}) = \langle \delta(\mathbf{k})\delta(\mathbf{k}') \rangle$.在实际分析中,物质密度涨落场由观测样本和随机样本来构建,即 $F(\mathbf{r}) = \frac{w(\mathbf{r})}{I}[n_D(\mathbf{r}) - \alpha n_R(\mathbf{r})]$,其中 n_D 和 n_R 分别是观测样本和随机样本的数密度, α 是观测样本和随机样本的数目之比,归一化因子 $I = \int d\mathbf{r} w^2(\mathbf{r}) n_D^2(\mathbf{r})$, $w(\mathbf{r})$ 是星系的权重.进而,测量功率谱 $P(\mathbf{k}) = \langle |F(\mathbf{k})|^2 \rangle - P_{\text{shot}}$ ^[23],其中 $F(\mathbf{k})$ 是 $F(\mathbf{r})$ 的傅立叶变换,可以通过快速傅立叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法实现.具体地,两类示踪天体A和B的交叉功率谱多极距测量如下^[12]:

$$P_l^{AB}(\mathbf{k}) = \frac{2l+1}{2I_{AB}} \int \frac{d\Omega_{\mathbf{k}}}{4\pi} [F_{0,A}(\mathbf{k})F_{l,B}(-\mathbf{k}) + F_{0,B}(\mathbf{k})F_{l,A}(-\mathbf{k})]. \quad (2)$$

1.3 测量BAO和RSD

2016年,BOSS国际合作组公布了该项目5年巡天

图1 BOSS和eBOSS测绘最大的宇宙三维图像。(a)区域1和2分别代表红移大于2.1的高红移类星体的莱曼阿尔法线丛观测和红移小于0.75的亮红星系覆盖天区,区域3是SDSS一期和二期观测的近邻星系。(b)区域1:红移大于2.1的高红移类星体莱曼阿尔法线丛观测;区域2:红移在0.8~2.2范围的类星体;区域3:红移在0.6~1.1范围的发射线星系;区域4:红移在0.6~1.0范围的亮红星系.图像摘自SDSS巡天测绘的三维图像(<https://sketchfab.com/chengzhao/collections/sdss-volumes>)

Figure 1 BOSS and eBOSS releases the largest 3D map of the universe. (a) Region 1 and 2 denote the observation of Lyman- α forest from high- z ($z > 2.1$) quasars and the luminous red galaxies at $z < 0.75$, respectively. (b) Region 1 is the observation of Lyman- α forest from high- z ($z > 2.1$) quasars; region 2 is the clustering quasars at $0.8 < z < 2.2$; region 3 is the emission line galaxies at $0.6 < z < 1.1$; region 4 is the luminous red galaxies at $0.6 < z < 1.0$. Image credit: An image taken from 3D map of SDSS (<https://sketchfab.com/chengzhao/collections/sdss-volumes>)

的完整数据和最后一批科学成果。最终, 合作组通过对近120万颗星系的成团性进行分析, 成功探测到最强的BAO信号, 实现了1%精度的BAO距离测量和6%精度的RSD测量^[24]。这是目前基于星系红移巡天得到的最高精度的BAO和RSD测量。

为了提取星系成团性的红移演化信息, BOSS合作组在多个宇宙学红移处测量关联函数和功率谱(图2)。从关联函数的测量结果中(图2(a)), 可以清晰地看到大尺度上明显的BAO成团特征, 以及中等尺度上RSD的特征; 同样的信号也体现在功率谱多极距的测量中(图2(b))。利用关联函数和功率谱的测量, 我们在红移0.2~0.75范围内重建了宇宙膨胀历史(即哈勃参数和角直径距离随红移的演化^[25,26])和结构增长历史(即结构增长率随红移的演化^[27,28])。这是目前基于星系红移巡天获得的红移分辨率最高的BAO和RSD测量。这些层析BAO和RSD测量结果对探究暗能量的演化历史具有重要作用。

2017年, eBOSS国际合作组公布了首批观测数据, 即在2044平方度天区、红移 $0.8 < z < 2.2$ 范围内、对14.7万个类星体的光谱观测。这是人们第一次直接用遥远的类星体来示踪宇宙的物质分布。合作组成功获得了红移1~2区间的第一个BAO测量, 精度达到3.8%。高红移处($z=1.52$)的eBOSS BAO测量与较低红移处($0.2 < z < 0.75$)的BOSS BAO测量在检验宇宙学参数上形成互补^[13]。结合不同红移处的测量, 有助于破除宇宙学参数之间的简并, 提高限制精度。联合限制结果在6.5个标准差水平上证实了暗能量的存在^[29]。

2018年, 基于首批类星体的观测数据, eBOSS国际合作组发布了RSD测量的科学成果, 利用不同的统计观测测量, 给出了唯一一个高红移($z=1.52$)的宇宙结构增长率测量^[30-32]。同期, 也发布了层析BAO和RSD的测量^[33,34]。合作组通过对每个星系进行红移加权方案来优化提取星系成团中的红移演化信息, 最终重建了0.8~2.2红移区间的宇宙膨胀历史(图3(a): 不同测量距离随红移的演化, 其中 $\alpha_{\perp} \equiv \frac{(D_{\Lambda}/r_d)}{(D_{\Lambda}/r_d)_{\text{fid}}}$ 和 $\alpha_{\parallel} \equiv \frac{(H r_d)}{(H r_d)_{\text{fid}}}$ 分别是垂直视线和平行视线方向上BAO距离的测量; $\alpha \equiv (\alpha_{\perp}^2 \alpha_{\parallel})^{1/3}$ 表征各项同性的BAO距离测量)和结构增长历史(图3(b): 结构增长参数 $f\sigma_8$ 随红移的演化, 其中 σ_8 表征半径为8 h^{-1} Mpc尺度范围内的物质成团强度, 与结构增长率参数 f 存在简并。目前, 通常采用 $f\sigma_8$ 这样的

组合参数来表征宇宙的结构增长率)。

2020年7月, eBOSS合作组发布了历时4.5年的所有观测数据和多篇科学成果, 涉及大尺度结构星系成团性数据分析的各个关键环节, 具体包括不同类型示踪星表的产生、基于不同方法的模拟数据生成、各个类型星系的统计分析、不同类型星系的交叉分析、测量结果的宇宙学应用等。

eBOSS的一个最突出观测特点是, 首次提供了在大天区面积和红移区间有重叠的多类型星系数据。这为开展交叉关联分析提供了重要的数据支撑。交叉关联分析是宇宙学研究中的常用方法, 其最大的优点是可以避免来自系统误差的污染。不同类型星系的交叉关联分析还有一个好处, 就是可以消除宇宙方差, 减小统计误差^[35,36]。eBOSS合作组利用亮红星系和发射线星系, 通过交叉关联函数和交叉功率谱分析, 成功测量了BAO和RSD^[11,12]。图4展示了基于eBOSS亮红星系和发射线星系的交叉关联函数和交叉功率谱测量, 可以清晰地看到关联函数中在约100 h^{-1} Mpc尺度上BAO的局部突出(local bump)特征, 以及功率谱中的振荡特征(BAO wiggles)。在中等尺度上, 由RSD造成的“挤压”特征非常明显。比较单源样本的分析结果, 亮红星系和发射线星系联合分析得到的测量精度提高了10%^[11]。

2 暗能量检验

与暗能量性质紧密联系的物理参量主要是其能量密度, 即 $X(z) \equiv \rho/\rho_0$, ρ_0 是红移 $z=0$ 处的暗能量密度, 或者由其压强和能量密度定义的状态方程, 即 $w(z) \equiv P/\rho$ 。标准宇宙学常数模型(Λ cold dark matter, Λ CDM)中, 暗能量为真空能。真空能具有恒为-1的状态方程, 能量密度不会随着宇宙的空间膨胀被稀释, 即 $X \equiv 1$ 。在动力学暗能量模型中, $X(z)$ 随时间演化, 影响宇宙的膨胀历史:

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_{m0}(1+z)^3 + (1 - \Omega_{m0})X(z)}. \quad (3)$$

检验暗能量的动力学性质是暗能量研究领域的关键课题之一。

图5显示了在过去10年里, 合作组依托BOSS和eBOSS巡天重建的宇宙膨胀历史和结构增长历史。利用BOSS和eBOSS的测量数据, 并结合SDSS-II和6dFGRS的低红移BAO测量, eBOSS合作组获得了BAO数据对 Λ CDM的最强限制, 在11个标准差水平上证实了暗能量的存在^[11,12]。

图2 利用BOSS完整数据,在9个红移处测量的两点关联函数(a)^[25]和功率谱多极距(b)^[26]
Figure 2 The measurements of the anisotropic correlation function^[25] (a) and power spectrum multipoles^[26] (b) at nine redshifts derived from the completed BOSS data

随着测量精度的不断提高,不同观测数据探测的核心宇宙学参数值出现不同程度的不自洽。最具代表性的是哈勃常数危机(H_0 tension),具体指,基于Planck卫星的宇宙微波背景辐射观测(宇宙早期)得到的哈勃常数值,与近邻宇宙(宇宙晚期)观测给出的测量值之间

不一致已达到 $4\sigma\sim 6\sigma$ (图6(a))^[37]。不同宇宙时期的数据测量差异或是由于数据分析中存在未知的系统误差,亦或是存在超出标准宇宙学模型的新物理。

在这种情况下,观测上寻求其他宇宙探针对于 H_0 进行独立检验是非常重要的。eBOSS合作组利用BAO测

图3 利用eBOSS首批类星体数据, 在红移0.8~2.2区间重建宇宙膨胀历史((a), 紫色阴影)^[33]和结构增长历史((b), 红点带误差棒)^[34]
Figure 3 The reconstruction of the cosmic expansion ((a), purple bands)^[33] and structure growth ((b), red points with error bars)^[34] within the redshift range of [0.8, 2.2] using the eBOSS DR14 data

图4 利用完整的eBOSS亮红星系和发射线星系测量的交叉关联函数^[11](a)和交叉功率谱^[12](b)
Figure 4 The measurement of cross-correlation^[11] (a) and cross-power spectrum^[12] (b) derived from the completed eBOSS luminous red galaxies and emission line galaxies

图5 基于BOSS和eBOSS巡天的BAO距离测量(a)和RSD测量(b)^[12]
Figure 5 The measurement of BAO (a) and RSD (b) using BOSS and eBOSS data^[12]

量结果考察了 H_0 tension问题^[38]. 在 Λ CDM模型中, 单独使用BAO数据无法破除 H_0 和声速视界两者之间的简并(图6(b)). 正是由于 H_0 和 r_d 的简并, H_0 tension可以通过调

节 r_d 的限制被缓和. 例如, 联合BAO和近邻宇宙的哈勃常数测量, 可以给出较小的 r_d (对比Planck限制结果), 从而得到较大的 H_0 . 早期暗能量模型(early dark energy

models)正是通过减小声速视界值来解决哈勃常数问题的^[39].

动力学暗能量是解决哈勃危机的有效方法之一. 2018年, 我们利用BOSS的层析BAO测量, 并结合超新星数据、Planck观测数据、哈勃太空望远镜, 对近邻宇宙观测得到的 H_0 测量值以及高红移来自Lyman- α 线丛观测得到的BAO, 使用非参数化方法, 成功重建了暗能量密度从早期宇宙($z=1100$)到今天($z=0$)的演化历史. 结果显示, 在 3.7σ 置信水平, 暗能量密度有偏离1的演化行为(图7(a))^[40], 表明暗能量可能不是真空能. 此外, 我们还首次揭示了在高红移处, 暗能量具有负值等效能量

密度的迹象. 标量-张量引力提供了一种理论框架来解释这一动力学暗能量^[41]. 在重建的动力学暗能量模型下, 联合数据给出的哈勃常数结果为 $H_0=70.3\pm0.998$, 而相同数据下 Λ CDM的限制结果为 $H_0=68.4\pm0.387$ ^[40], 说明能量密度随时间演化的动力学暗能量可在一定程度上缓和哈勃危机. 最新的eBOSS BAO距离测量发布以后, 我们将其与动力学暗能量的距离预测做了比较(图7(b)), 发现两者在误差范围内一致^[11].

3 总结与展望

重力声波振荡和红移空间畸变是探测暗能量的重

图6 基于Planck卫星的宇宙微波背景辐射观测(宇宙早期)和近邻宇宙(宇宙晚期)观测得到的哈勃常数值汇总^[37](a), 以及BAO数据(蓝色)、BAO和大爆炸核合成(Big Bang nucleosynthesis, BBN)观测(深蓝色)、BAO和近邻宇宙观测得到的哈勃常数值(紫色)以及Planck数据(灰色)给出的哈勃常数 H_0 和声速视界 r_d 的联合限制^[38](b)

Figure 6 A summary of the Hubble constant measured by the Planck data and from local-Universe observations^[37] (a), and constraints on the Hubble constant H_0 and sound horizon r_d using BAO data (blue) in combination with Big Bang nucleosynthesis (BBN, dark blue) and H_0 measurement from local-Universe data (purple) in contrast to that from Planck data (grey)^[38] (b)

图7 联合天文观测重建的暗能量密度演化历史^[40](a)以及最新eBOSS数据测量的BAO结果和动力学暗能量的距离预测比较^[11](b)

Figure 7 A reconstruction of dark energy density^[40] (a), and a comparison of the latest BAO measurements from eBOSS and the distances predicted by the reconstructed dynamical dark energy^[11] (b)

要宇宙探针. 大型国际合作项目BOSS和eBOSS巡天通过对红移2.2以下不同星系的观测, 以及红移2.1以上的莱曼阿尔法线丛观测, 成功获得了不同红移处的BAO和RSD精确测量. 具体来讲, BOSS和eBOSS联合BAO的测量精度在红移1以下为0.7%, 在 $z>1$ 为1.2%; RSD在红移 $0<z<1.5$ 的平均测量精度可达到5%. 这些高精度的测量为开展暗能量研究提供了重要的数据支持, 合作组已获得了基于红移巡天的 Λ CDM模型的最强限制.

目前, 第四代星系巡天项目已经启动, 比如暗能量光谱仪巡天(Dark Energy Spectroscopic Instrument, DESI)、日本的主焦点光谱仪巡天(Prime Focus Spectrograph, PFS)、欧空局的Euclid空间巡天项目, 以及我国的空间站光学巡天等, 将实现在更高红移、更大天区的巡天观测. DESI是目前正在运行的最大规模巡天, 将在更大天区面积探测更高红移的宇宙, 其观测的星系数目将是BOSS和eBOSS的10倍, 将显著降低BAO和RSD的统计误差, 实现暗能量研究领域的突破.

参考文献

- 1 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron J*, 1998, 116: 1009–1038
- 2 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586
- 3 Zhao G B. Progress in understanding the cosmic acceleration (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 2422–2428 [赵公博. 暗能量和加速膨胀的宇宙. 科学通报, 2018, 63: 2422–2428]
- 4 Eisenstein D J. Dark energy and cosmic sound. *New Astron Rev*, 2005, 49: 360–365
- 5 White M. Baryon oscillations. *Astropart Phys*, 2005, 24: 334–344
- 6 Kaiser N. Clustering in real space and in redshift space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1987, 227: 1–21
- 7 Dodelson S. Modern Cosmology. Pittsburgh: Academic Press, 2003
- 8 Peacock J A, Cole S, Norberg P, et al. A measurement of the cosmological mass density from clustering in the 2dF Galaxy Redshift Survey. *Nature*, 2001, 410: 169–173
- 9 Cole S, Percival W J, Peacock J A, et al. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Power-spectrum analysis of the final data set and cosmological implications. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2005, 362: 505–534
- 10 Eisenstein D J, Zehavi I, Hogg D W, et al. Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. *Astrophys J*, 2005, 633: 560–574
- 11 Wang Y, Zhao G B, Zhao C, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR16 luminous red galaxy and emission line galaxy samples: Cosmic distance and structure growth measurements using multiple tracers in configuration space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 498: 3470–3483
- 12 Zhao G B, Wang Y, Taruya A, et al. The completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A multi-tracer analysis in Fourier space for measuring the cosmic structure growth and expansion rate. 2020, arXiv: 2007.09011
- 13 Wang Y, Xu L, Zhao G B. A measurement of the Hubble constant using galaxy redshift surveys. *Astrophys J*, 2017, 849: 84
- 14 Philcox O H E, Ivanov M M, Simonović M, et al. Combining full-shape and BAO analyses of galaxy power spectra: A 1.6% CMB-independent constraint on H_0 . *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, (5): 032
- 15 Ivanov M M, Simonović M, Zaldarriaga M. Cosmological parameters and neutrino masses from the final Planck and full-shape BOSS data. *Phys Rev D*, 2020, 101: 083504
- 16 Tröster T, Sánchez A G, Asgari M, et al. Cosmology from large-scale structure. *Astron Astrophys*, 2020, 633: L10
- 17 Colas T, d'Amico G, Senatore L, et al. Efficient cosmological analysis of the SDSS/BOSS data from the effective field theory of large-scale structure. *J Cosmol Astropart Phys*, 2020, (6): 001
- 18 Zhao G B, Raveri M, Pogosian L, et al. Dynamical dark energy in light of the latest observations. *Nat Astron*, 2017, 1: 627–632
- 19 Aghamousa A, Aguilar J, Ahlen S, et al. The DESI experiment part I: Science, targeting, and survey design. 2016, arXiv: 1611.00036
- 20 Eisenstein D J, Weinberg D H, Agol E, et al. SDSS-III: Massive spectroscopic surveys of the distant Universe, the Milky Way, and extra-Solar planetary systems. *Astron J*, 2011, 142: 72
- 21 Dawson K S, Kneib J P, Percival W J, et al. The SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Overview and early data. *Astron J*, 2016, 151: 44
- 22 Landy S D, Szalay A S. Bias and variance of angular correlation functions. *Astrophys J*, 1993, 412: 64
- 23 Feldman H A, Kaiser N, Peacock J A. Power-spectrum analysis of three-dimensional redshift surveys. *Astrophys J*, 1994, 426: 23

- 24 Alam S, Ata M, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 470: 2617–2652
- 25 Wang Y, Zhao G B, Chuang C H, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Tomographic BAO analysis of DR12 combined sample in configuration space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 469: 3762–3774
- 26 Zhao G B, Wang Y, Saito S, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Tomographic BAO analysis of DR12 combined sample in Fourier space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 466: 762–779
- 27 Wang Y, Zhao G B, Chuang C H, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A tomographic analysis of structure growth and expansion rate from anisotropic galaxy clustering. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 481: 3160–3166
- 28 Zheng J, Zhao G B, Li J, et al. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A tomographic measurement of structure growth and expansion rate from anisotropic galaxy clustering in Fourier space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 484: 442–450
- 29 Ata M, Baumgarten F, Bautista J, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: First measurement of baryon acoustic oscillations between redshift 0.8 and 2.2. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 473: 4773–4794
- 30 Hou J, Sánchez A G, Scoccimarro R, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: Anisotropic clustering analysis in configuration space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 480: 2521–2534
- 31 Zarrouk P, Burtin E, Gil-Marín H, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: Measurement of the growth rate of structure from the anisotropic correlation function between redshift 0.8 and 2.2. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 477: 1639–1663
- 32 Gil-Marín H, Guy J, Zarrouk P, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: Structure growth rate measurement from the anisotropic quasar power spectrum in the redshift range $0.8 < z < 2.2$. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 477: 1604–1638
- 33 Wang D, Zhao G B, Wang Y, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: Anisotropic baryon acoustic oscillations measurements in Fourier-space with optimal redshift weights. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2018, 477: 1528–1535
- 34 Zhao G B, Wang Y, Saito S, et al. The clustering of the SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey DR14 quasar sample: A tomographic measurement of cosmic structure growth and expansion rate based on optimal redshift weights. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2019, 482: 3497–3513
- 35 Seljak U. Extracting primordial non-Gaussianity without cosmic variance. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 021302
- 36 McDonald P, Seljak U. How to measure redshift-space distortions without sample variance. *J Cosmol Astropart Phys*, 2009, (10): 007
- 37 Verde L, Treu T, Riess A G. Tensions between the early and late Universe. *Nat Astron*, 2019, 3: 891–895
- 38 Alam S, Aubert M, Avila S, et al. The completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from Two Decades of Spectroscopic Surveys at the Apache Point Observatory. 2007, arXiv: [2007.08991](https://arxiv.org/abs/2007.08991)
- 39 Poulin V, Smith T L, Karwal T, et al. Early dark energy can resolve the Hubble tension? *Phys Rev Lett*, 2019, 122: 221301
- 40 Wang Y, Pogosian L, Zhao G B, et al. Evolution of dark energy reconstructed from the latest observations. *Astrophys J*, 2018, 869: L8
- 41 Zucca A, Pogosian L, Silvestri A, et al. Generalized Brans-Dicke theories in light of evolving dark energy. *Phys Rev D*, 2020, 101: 043518

Summary for “星系红移巡天宇宙学——探索暗能量”

Cosmology with galaxy redshift surveys: Probing dark energy

Yuting Wang¹ & Gong-Bo Zhao^{1,2*}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: gbzhao@nao.cas.cn

The accelerating expansion of the Universe is one of the most significant discoveries in sciences in the 20th century, and revealing the underlying physics is a key scientific mission in modern physics and astronomy. Specifically, problems to be tackled include: (1) How to extract information relevant to dark energy from observations? (2) Is dark energy dynamical? (3) What is the nature of dark energy? Dark energy leaves imprints on the expansion rate and structural growth history of the Universe, which can be probed respectively by the baryonic acoustic oscillations (BAO) and redshift space distortions (RSD). BAO and RSD are specific three-dimensional clustering patterns of galaxies in redshift space, which are best measured from large galaxy spectroscopic surveys. Large galaxy surveys including the Sloan Digital Sky Survey (SDSS), Two-Degree-Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS), WiggleZ, the Galaxy And Mass Assembly (GAMA) survey, and so on, have taken millions of high-quality spectra of distant galaxies, and have created the largest three-dimensional map of the Universe to date. This has raised the precision of the distance measurement to a level of one per cent, which is crucial to observational tests of dark energy.

In this article, we introduce the world largest galaxy redshift surveys in the last decade, including the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) as part of the SDSS-III program, and the extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS) of SDSS-IV, and review the progress of cosmological implications, especially on studies of dark energy.

During 2009–2014, the BOSS survey took approximately one million spectra of red galaxies below redshift 0.6. To fully use the tomographic information of the galaxy clustering along the past lightcone, which is crucial for probing the time evolution of dark energy, we measured the BAO and RSD in multiple over-lapping redshift slices. This made it possible to reconstruct the evolution history of dark energy at a high resolution in redshift. Interestingly, we found that a dynamical dark energy model is favored by data at a 3.7σ level.

During 2014–2020, we participated in the eBOSS survey, which is a multi-tracer survey beyond redshift 0.6. Having obtained around one million spectra in total for the luminous red galaxies (LRGs), emission line galaxies (ELGs) and quasars, we successfully performed a cross-correlation analysis between LRGs and ELGs, and found an evidence of the accelerating Universe at a 11σ level. This is the strongest observational evidence to date from galaxy surveys, which is completely independent from cosmic microwave background (CMB) and supernovae (SNe).

We are now in Stage-IV on dark energy studies, based on the Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) survey built on the 4-meter Mayall telescope. DESI is a multi-tracer survey covering one quarter of the sky, and will deliver roughly 20 million high-quality spectra for multiple types of galaxies in a wide redshift range. From the forecast, DESI will be able to probe the dynamical dark energy at more than 5σ confidence level, and will shed light on the nature of dark energy, modified gravity, neutrino mass and other science frontiers in cosmology.

galaxy survey, baryonic acoustic oscillations, redshift space distortions, cosmic expansion rate, growth rate of cosmic structure, dark energy

doi: [10.1360/TB-2021-0071](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0071)