

暗能量和加速膨胀的宇宙

赵公博

中国科学院国家天文台, 北京 100101

E-mail: gbzhao@nao.cas.cn

2018-03-15 收稿, 2018-06-08 修回, 2018-06-13 接受, 2018-07-26 网络版发表

摘要 1998年发现的宇宙加速膨胀是当代科学中最重大的课题之一. 理论上, 宇宙的加速膨胀可能意味着当前宇宙中约三分之二的能量密度是由一种新的能量组分, 即暗能量所提供的也可能意味着爱因斯坦提出的广义相对论在宇宙学尺度上需要修正. 暗能量和修正引力这两种完全不同的物理机制可以给出完全相同的宇宙背景膨胀历史, 但却预言不同的结构形成过程. 因此, 我们可以通过观测宇宙的大尺度结构形成和演化来区分这两种不同的物理机制, 揭示宇宙加速膨胀背后的物理规律. 宇宙大尺度星系巡天是研究宇宙加速膨胀机制的重要探针之一. 基于星系巡天, 我们可以通过测量重子声波振荡(baryonic acoustic oscillations, BAO)和红移空间畸变(redshift space distortions, RSD)两种特殊的星系成团属性, 同时测量宇宙的背景膨胀和结构形成历史, 进而分别开展暗能量性质以及引力研究. SDSS(Sloan Digital Sky Survey)三期的BOSS(Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey)巡天是近期完成的世界最大规模的星系巡天. 通过对10000平方度左右天区的观测, BOSS获取了近一百万条星系光谱. 基于BOSS的观测, 我们对暗能量和引力性质开展了深入研究, 并发现了暗能量的动力学迹象. 目前正在巡天的eBOSS(extended Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey)项目以及后续的DESI(Dark Energy Spectroscopic Instrument)和PFS(Prime Focus Spectrograph)等大型巡天将在更高的红移、以更高的精度测量BAO和RSD, 这将为宇宙加速膨胀机制的研究提供关键的观测支持.

关键词 暗能量, 修正引力, 大尺度星系巡天, 重子声波振荡, 红移空间畸变

1998年, 国际上两个小组通过对超新星的观测和分析, 独立地发现了宇宙当前正在加速膨胀^[1,2]. 该结果一经发表, 不仅在科学界引起极大反响, 也震惊了全世界. 该成果当年就被*Science*评为世界十大科技进展之一, 并排名榜首. 在接下来的几年中, 宇宙的加速膨胀分别被其他不同类型的天文观测独立证实, 包括测量宇宙微波背景辐射(CMB)的美国WMAP卫星实验^[3], 测量宇宙大尺度结构(LSS)的SDSS(Sloan Digital Sky Survey)光谱巡天实验^[4]等. 2011年, 3名最早发现宇宙加速膨胀的科学家被授予诺贝尔物理学奖.

解释宇宙的加速膨胀是现代科学中最大的挑战

之一. 其原因是根据爱因斯坦的引力理论(即广义相对论, 迄今为止最为成功的引力理论), 一个只包含物质(包括重子物质、暗物质、光子、中微子等)的宇宙只能减速膨胀, 而不能加速膨胀. 广义相对论的基本方程(爱因斯坦方程), $G_{\mu\nu}=8\pi GT_{\mu\nu}$, 方程左边的爱因斯坦张量 $G_{\mu\nu}$ 表征时空的性质, 而右边的能动量张量 $T_{\mu\nu}$ 则描述物质的分布和运动. 时空的加速膨胀既可以通过修正 $G_{\mu\nu}$ 实现, 即修正引力, 也可以通过修正 $T_{\mu\nu}$, 即引入具有负压的暗能量来实现. 理论上, 修正引力和引入暗能量这两种不同的物理机制可以给出同样的宇宙膨胀历史, 却预言不同的宇宙结构形成. 因此, 利用超新星、CMB、大尺度星系巡天等

引用格式: 赵公博. 暗能量和加速膨胀的宇宙. 科学通报, 2018, 63: 2422–2428

Zhao G B. Progress in understanding the cosmic acceleration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2422–2428, doi: 10.1360/N972018-00243

试验同时探测宇宙的背景膨胀和结构形成历史,从原则上这两种物理机制可以被区分,这对于揭示宇宙加速膨胀现象背后的新物理有重要意义.

无论是暗能量的存在,还是修正引力的假说,一旦被证实,都将彻底改变我们对于宇宙的认识.发现宇宙加速膨胀现象背后的新物理,将掀起一场物理学的革命,并将产生深远影响.因此,近年来,世界主要科技强国都在集中优秀科学家的力量,投入巨资建立大型巡天实验,以试图揭开宇宙加速膨胀之谜.比如欧洲的Planck微波背景辐射和Euclid宇宙大尺度结构卫星巡天,美国的SDSS-III, SDSS-IV, Dark Energy Survey (DES), Large Synoptic Survey Telescope (LSST), Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)等大尺度结构巡天,以及澳大利亚和南非联合开展的平方千米射电巡天项目(Square Kilometer Array, SKA).

1 模型介绍

暗能量的物理性质主要由其压强与能量密度的比值,即被称为状态方程的参量 w 决定.不同暗能量模型可以用 w 进行分类.比如,在传统的真空能-冷暗物质(Λ CDM)模型中,暗能量为真空能,其 $w=-1$.尽管这个模型几乎满足迄今为止所有的天文观测,但真空能作为暗能量有严重的理论困难,比如精细调节问题(fine-tuning problem)^[5].动力学暗能量模型则可以在一定程度上解决这个问题.在动力学暗能量模型中, w 是红移 z 的函数,即 w 随时间演化.特别地, $w>-1$ 对应“精质”模型(quintessence)^[6]; $w<-1$ 对应“幽灵”模型(phantom)^[7];而 w 在演化过程中越过 -1 则与“精灵”模型(quintom)的预言相一致^[8].从天文观测中探测暗能量的动力学行为对于研究暗能量的性质至关重要.比如,如果 w 越过 -1 则说明暗能量有内禀自由度,即暗能量不是由单一组分构成的.这对于研究暗能量本质有重要意义.

此外,广义相对论(GR)已经在从实验室尺度到太阳系尺度上被高精度的实验验证.然而,在宇宙学尺度上,我们对GR的正确性只是猜测.而宇宙的加速膨胀则说明GR在宇宙学尺度上可能需要修正.原则上,我们可以通过修改引力(即修改爱因斯坦方程左边),来模拟暗能量的作用,从而实现宇宙的加速膨胀.但是,与引入暗能量(即修改爱因斯坦方程右边)不同的是,一旦在极大尺度上修改引力以获得加

速膨胀,在其他尺度上(包括星系及更小尺度)也要相应修改引力,否则理论上将不自洽.这是由于修改引力会带来新的自由度(通常为标量场),以传递第5种力(the fifth force)^[9].原则上,该力会在所有尺度上传递,因此所有尺度上动力学和结构的形成都将被影响.然而,GR在太阳系尺度上已经得到了实验的精确验证,因此我们需要某种物理机制在小尺度上屏蔽修改引力的影响. $f(R)$ 模型中的变色龙机制(chameleon mechanism)就是一个例子^[10].该模型中,标量场的质量随环境密度而变化,即在高密度区域,标量场质量变大,导致第5种力的力程变短,因为无法有效地在小尺度上传播,GR得以恢复.相反,在宇宙线性尺度上,平均密度较低,第5种力可以有效传播,引力得以增强,并可以被观测检验.

可以引起宇宙加速膨胀的修正引力模型有很多,比如 $f(R)$, DGP, Galileon等.在宇宙背景演化上,通过调节参数,这些模型可以给出和 Λ CDM模型相近甚至相同的加速膨胀.然而在扰动层次上,由于第5种力的作用,这些模型会预言不同于 Λ CDM的结构形成.在宇宙大尺度,即线性尺度上,修正引力模型中的结构形成相对于 Λ CDM模型的差别,可以用两个时间和空间的二元函数 $\mu(k,a)$ 和 $\eta(k,a)$ 描述.这两个函数分别代表修正引力模型中,有效的牛顿常数和光子轨迹对测地线的偏离(均无量纲).在 Λ CDM中, $\mu(k,a)=\eta(k,a)=1$.而修正引力中,这两个函数对于1会有较大偏离,比如 $f(R)$ 中, μ 和 η 的最大值分别为 $4/3$ 和 $1/2$ ^[11].

2 探测手段

在天文观测手段上,研究暗能量和修正引力的宇宙学探针包括以下几个方面.

(i) 超新星的红移-光度距离关系.处在不同红移处的超新星是测定宇宙背景演化的“标准烛光”.利用超新星测量得到的红移-光度距离关系,宇宙的背景膨胀历史可以被重建.宇宙的加速膨胀现象正是被超新星的观测首先发现的.由于暗能量的行为在很大程度上决定了晚期宇宙的背景演化,超新星观测是研究暗能量的关键探针之一.

(ii) 重子声波振荡(BAO)^[12,13].重子声波振荡的产生是由于在宇宙早期,重子和光子紧密耦合在一起,在引力和压强共同作用下形成的类似声波模式的振荡.这种振荡使得早期宇宙中形成的局部物

质扰动像声波一样向外传播. 随着宇宙温度降低, 光子与重子退耦, 这时压强消失, 致使物质扰动无法再继续向外传播, 并在引力作用下放大, 形成更深的引力势井. 由于声波只传播到一定的距离, 而在这些局部的引力势井内部会形成星系, 这就导致了星系的分布在某个特定的尺度上达到局部的最大值. 这个特定尺度被称作“宇宙标尺”, 它大致是150 Mpc, 依赖于宇宙学参数, 特别是暗能量状态方程 w . 测量BAO尺度最有效的方式是利用大尺度星系光谱巡天或测光巡天. 通过大样本统计分析星系的成团性信息(通常通过三维星系功率谱、两点关联函数, 或二维角功率谱), BAO尺度可以被测量. 目前SDSS-III的BOSS巡天对这个尺度的测量精度为2%($z=0.32$)和1%($z=0.57$). 2020年左右, eBOSS将以1%~2%的精度, 在红移 $0.6 < z < 2.2$ 的范围内获取BAO尺度信息^[14]. BAO尺度几乎不受观测系统误差影响, 是暗能量观测的另一枚关键探针.

(iii) 红移空间畸变(RSD)^[15]. 红移畸变现象是由于星体在局部引力势的作用下形成的一种特殊的三维成团模式. 由于该信号与引力直接相关, 它是在宇宙学尺度上研究引力的最重要探针之一. 利用星系光谱巡天是测量RSD的主要手段. 在星系光谱巡天中, 星系的红移被光谱仪精确测量. 如果有足够大的样本, 我们就可以利用统计方法获取产生星系本动速度的引力势的信息, 进而获取红移畸变参数 $f\sigma_8$ 在特定红移的值. 2001年, 人类首次通过观测星系的成团性, 在近邻宇宙中发现了红移畸变现象. RSD数据可以被直接用来限制宇宙学参数, 特别是与结构形成相关的参数, 比如暗能量和修改引力模型的参数等. BOSS巡天仅能在10%的精度上在 $z=0.57$ 处测量 $f\sigma_8$ ^[16]. eBOSS的观测完备后, 将在更大的红移范围内, 以更高的精度测量此物理量. eBOSS合作组根据预研究给出的预期测量精度为: (1) 在 $0.6 < z < 0.9$ 范围内, 利用亮红星系测量 $f\sigma_8$ 的精度为3.5%; (2) 在 $0.6 < z < 1.0$ 范围内, 利用发射线星系测量 $f\sigma_8$ 的精度为4.5%; (3) 在 $0.9 < z < 2.2$ 范围内, 利用类星体测量 $f\sigma_8$ 的精度为4%^[14].

(iv) 弱引力透镜效应(weak Lensing)^[17]. 从背景星系发出的光子, 受前景暗物质晕和星系形成的引力势的影响, 会发生偏折. 这会导致背景星系的图像发生大小和形状变化. 统计上, 这些形变的功率谱可以由理论计算给出. 而这些功率谱与宇宙学紧密

相关. 目前最大规模的引力透镜试验DES正在巡天观测, 将提供5000平方度天区的引力透镜测量. 这将对暗能量和修改引力的研究提供重要支持.

(v) 积分Sachs-Wolfe效应(ISW)^[18]. 光子在落入和出离引力势井的过程中, 如果引力势井保持不变, 则光子的净能量没有变化. 但是如果在此过程中, 引力势井发生了演化, 那么光子的净能量也会相应发生变化, 并体现在CMB大尺度功率谱上, 这就是积分Sachs-Wolfe效应. 这个信号可以通过把CMB天图数据与大尺度结构巡天的天图数据交叉关联得到. ISW是探测暗能量和修正引力的有力探针.

(vi) 中性氢强度映射(HIIM). 与星系的三维分布类似, 宇宙中中性氢的三维分布也可以有效示踪宇宙中的物质分布. 原则上, 可以通过强度映射(Intensity Mapping)技术, 利用中性氢巡天测量BAO和RSD信号, 进而探测暗能量和修正引力. 不过, 由于中性氢所占的能量组分很低, 前景污染严重, 中性氢巡天要比星系光谱巡天难度大得多. 目前国际上尚无完成的IM巡天. 正在运行的有LOFAR, ASKAP, 加拿大的CHIME和我国的天籁项目都正在建设当中. SKA巡天计划将在未来5~10年内开始观测.

(vii) 星系动力学方法. Integrated Field Units (IFU)光谱巡天不是仅测定目标星系的中心, 而是对整个星系的表面测定三维光谱. 这类巡天可以分别测定星系内部不同组分(比如气体和恒星)的速度曲线. 这一点对于在星系尺度上检验爱因斯坦引力至关重要.

3 目前观测限制

2016年, BOSS星系巡天公布了全部观测数据以及宇宙学结果. 除了首次在有效红移0.57处以1%的精度测量了BAO信号, BOSS合作组还首次在红移0.2到0.75之间的9个有效红移处, 在5%以上的精度成功测量了层析(tomographic)BAO信号, 这也是目前为止红移分辨率最好的BAO测量.

2017年, BOSS合作组利用此层析(tomographic)BAO信号, 并结合了超新星以及Planck卫星观测的CMB数据, 成功运用非参数化方法重建了暗能量状态方程的时间演化历史^[19](图1). 如前所述, 在传统CDM宇宙学标准模型中, 暗能量是爱因斯坦在1917年提出的“宇宙学常数”, 其状态方程为值为-1的常数. 在此模型中, 暗能量不具有任何动力学性

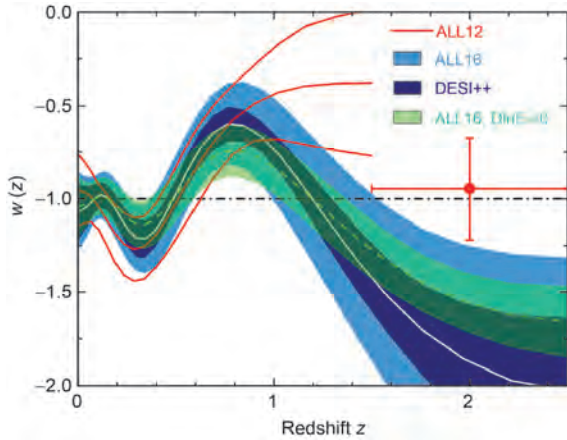


图1 利用最新天文观测重建的暗能量状态方程演化历史^[19]
Figure 1 A reconstruction of the equation of state of dark energy^[19]

质。但如图1所示,最新天文观测给出的 w 并非等于 -1 ,而是有动力学迹象,即在 3.5σ 核实是否用斜体的置信度上随红移演化,并越过 -1 。这是国际上首次在 3σ 以上发现暗能量的动力学特征,表明暗能量很可能不是爱因斯坦在100年前预言的宇宙学常数,而是某种动力场。当然,暗能量的本质还需等待未来更高精度的天文观测验证。

目前,国际上正在运行的最大规模星系巡天是eBOSS项目,是SDSS-IV的一个子项目。eBOSS是世界上最大的红移巡天。已完成的BOSS巡天的目标源比较单一,主要是亮红星系(LRG),而且巡天的红移较低($z < 0.6$)。而eBOSS将首次在高红移实现多源光谱巡天,即: (1) 在7500平方度范围内测定37.5万个LRG,其红移范围 $0.6 < z < 0.8$; (2) 在1500平方度范围内测定26万个发射线星系(ELG),其红移范围 $0.6 < z < 1.0$; (3) 在7500平方度范围内测定74万个类星体

(QSO),其红移范围达到 $0.9 < z < 3.5$ ^[14](图2)。

目前,eBOSS已经完成了前3年的巡天观测,获取了几十万条类星体、亮红星系和发射线星系光谱。2017年5月,eBOSS国际合作组织发布了首批科学结果:通过观测红移0.8到2.2之间的类星体空间分布,eBOSS合作组发现了显著的重子声波振荡信号。这是人类首次成功利用高红移类星体探测宇宙的膨胀历史。结合这个测量与近期BOSS合作组等发布的BAO测量信号,宇宙大尺度星系巡天在6.5个标准差水平上证实了暗能量的存在。这是除超新星、宇宙微波背景辐射观测之外的暗能量存在的又一独立证据。2018年,eBOSS合作组发布了最新科学结果:基于类星体观测,人类首次在高红移探测到了层析RSD信号^[20]。图3分别展示了截至目前,几乎全部的BAO和RSD测量结果(包括最新的eBOSS结果)。基于这些数据,爱因斯坦引力的预言与目前观测在95%置信度范围内一致^[20]。

DES是目前世界上正在运行的最大规模测光巡天。DES在大尺度(5000平方度)上测量弱引力透镜功

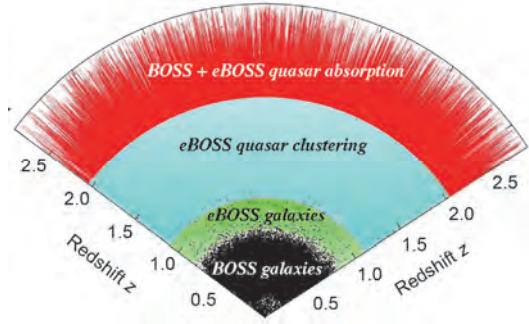


图2 eBOSS巡天深度示意图(SDSS-III官方网站)
Figure 2 An illustration of eBOSS (from the official SDSS-III website)

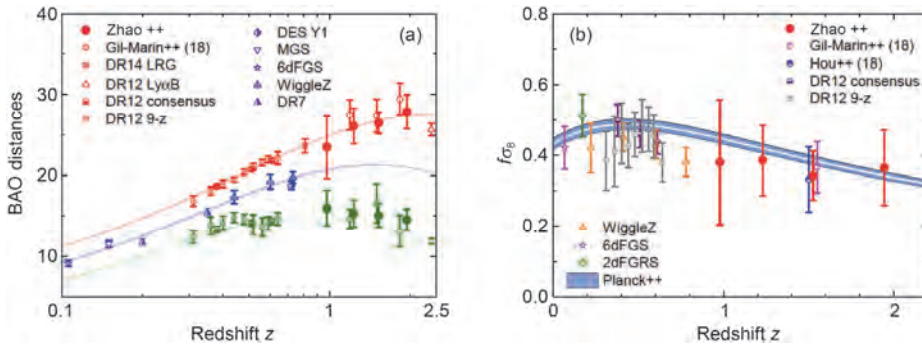


图3 重子声波振荡(a)和红移畸变(b)的目前测量结果汇总^[20]
Figure 3 A summary of recent BAO (a) and RSD (b) measurements^[20]

率谱(cosmic shear and magnification power spectra), 并提供Ia型超新星的数据. DES数据完备后, 将在暗能量本质研究, 以及宇宙学尺度上的引力检验提供强大的观测支持.

相比于宇宙学尺度的观测, 在星系或星系团这样的非线性尺度上的观测有更丰富的信息来检验引力. 比如, 可以通过对比星体的引力质量和惯性质量直接检验等效原理. 但修正引力模型中的结构形成要比GR中复杂得多. 这是由于标量场复杂的非线性动力学, 比如变色龙机制. 因此我们只能使用N体或者流体动力学数值模拟来研究. 图4展示两种不同引力模型的N体模拟结果^[21]. 图4(a)和(b)分别是GR和 $f(R)$ 理论预言的结构形成. 由图可见, 两个模型在大尺度结构上的预言相似, 但在小尺度上明显不同(见黄色圆圈区域). 利用这些高分辨率的N体模拟, 我们可以从很多方面深入研究修正引力理论中的非线性动力学, 并在星系尺度上设计新的引力检验方法. 比如, 在 $f(R)$ 框架中, 暗物质晕在被变色龙机制屏蔽时, 有明显的环境依赖性^[22]. 该方法具有简单易行、受系统误差影响小的优点, 并可以运用到巡天观测数据上.

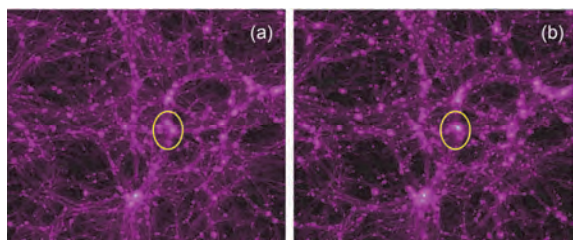


图4 爱因斯坦引力(a)和 $f(R)$ 修正引力(b)中的结构形成^[21]
Figure 4 N-body simulations for GR (a) and $f(R)$ (b) gravity models^[21]

4 展望

暗能量和引力研究需要结合从星系尺度、星系成团尺度到宇宙背景尺度的多种类型观测. 图5列举了国际上目前以及未来10年内即将开展的大型巡天计划. 具体来说, (1) 在星系尺度: 目前运行的MaNGA巡天是世界上最大规模的IFU巡天. MaNGA将对大约10000个近邻星系进行二维光谱测量. 重要的是, MaNGA可以分别测定星系内部不同组分(比如气体和恒星)的速度曲线. 这一点对于在星系尺度上利用星系动力学检验引力至关重要. 另外, DES巡天将获取约2000个星系团的引力质量轮廓. 而SDSS巡天或X射线巡天(如XMM-NEWTON)可以获取星系团动力学质量轮廓. 这就为星系(团)尺度上的等效原理检验提供了可能. 未来10年, 30 m望远镜TMT, LSST (8.4 m, 2021~2031年)等大型光学望远镜将提供大样本、高精度的星系团引力质量轮廓测量. (2) 在星系成团性尺度和宇宙学背景尺度, 未来的大型地面巡天包括DESI(4 m口径, 美国, 2019~), PFS(8 m, 日本, 2020~). DESI和PFS是国际上第4代星系光谱巡天. 其中DESI将在14000平方度天区内完成对近2000万条多类型星系光谱的观测, 而PFS将获取更高红移的光谱, 与DESI优势互补. 未来5年, DESI和PFS结合, 将把重子声波振荡和红移畸变信号的测量精度提高1个数量级(DESI和PFS结合将在百分之一至千分之一精度测量BAO和RSD), 将对暗能量等核心宇宙学前沿课题提供关键观测支持. 此外, 空间项目Euclid (1.2 m, 欧洲; 2021~), WFIRST(2.4 m, 美国, 2025?~) 以及我国正在建设的2 m空间巡天望远镜项目等也将

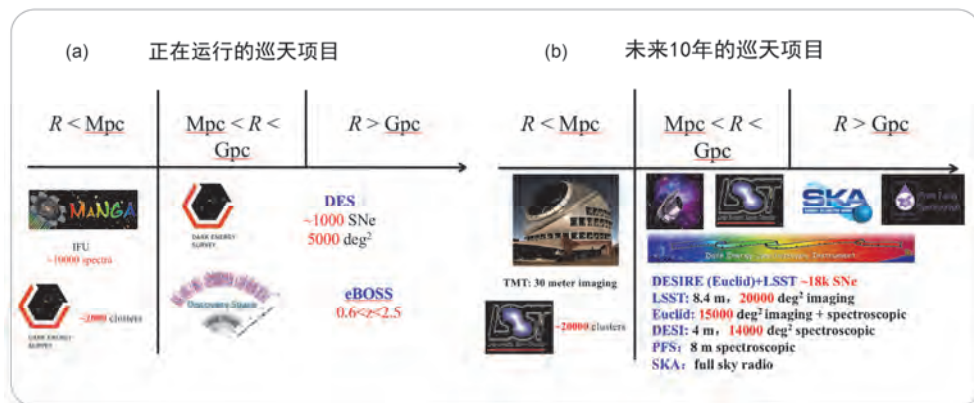


图5 目前(a)和未来10年内(b)的巡天观测项目
Figure 5 Ongoing (a) and forthcoming (b) galaxy surveys

在未来5~10年内运行. 这些项目在更高的红移, 以更高的精度测量BAO和RSD信号, 其核心科学目标是暗能量、修正引力等宇宙学前沿. 下一代国际大型的中性氢巡天是澳大利亚和南非的平方千米射电阵列SKA项目(SK A一期建设将于2023年结束, 二期将于2030年结束, 预计开展巡天观测50年), 我国将通过国际合作加入SKA.

依托未来10年之内的大型地面或者空间星系巡天项目, 我们期待将在5个标准偏差以上水平检验暗能量的动力学性质以及修正引力信号^[19]. 这些大型巡天还将精确测量中微子质量^[23], 并有可能首次区分两种中微子质量简并态^[14]. 因此, 可以说未来10年将是暗能量、修正引力等宇宙学前沿科学研究的黄金时期, 人类有可能获得一系列的重大科学发现.

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 Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae. *Astrophys J*, 1999, 517: 565–586
- 3 Spergel D N, Verde L, Peiris H V, et al. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters. *Astrophys J Suppl*, 2003, 148: 175–194
- 4 Tegmark M, Strauss M A, Blanton M R, et al. Cosmological parameters from SDSS and WMAP. *Phys Rev D*, 2004, 69: 103501
- 5 Weinberg S. The cosmological constant problem. *Rev Mod Phys*, 1989, 61: 1–23
- 6 Ratra B, Peebles P J E. Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field. *Phys Rev D*, 1988, 37: 3406
- 7 Caldwell R R. A phantom menace? *Phys Lett B*, 2002, 545: 23–29
- 8 Feng B, Wang X, Zhang X. Dark energy constraints from the cosmic age and supernova. *Phys Lett B*, 2005, 607: 35–41
- 9 Clifton T, Ferreira P G, Padilla A, et al. Modified gravity and cosmology. *Phys Rept*, 2012, 513: 1–189
- 10 Khoury J, Weltman A. Chameleon fields: Awaiting surprises for tests of gravity in space. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 171104
- 11 Zhao G B, Pogosian L, Silvestri A, et al. Cosmological tests of general relativity with future tomographic surveys. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 241301
- 12 Peebles P J E, Yu J T. Primeval adiabatic perturbation in an expanding universe. *Astrophys J*, 1970, 162: 815–836
- 13 Eisenstein D, 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
- 14 Zhao G B, Wang Y, Ross A J, et al. The extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: A cosmological forecast. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2016, 457: 2377–2390
- 15 Kaiser N. Clustering in real space and in redshift space. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1987, 227: 1–27
- 16 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
- 17 Schneider P, van Waerbeke L, Jain B, et al. A new measure for cosmic shear. *Mon Not Roy Astron Soc*, 1998, 296: 873–892
- 18 Sachs R K, Wolfe A M. Perturbations of a cosmological model and angular variations of the microwave background. *Astrophys J*, 1967, 147: 73–90
- 19 Zhao G B, Raveri M, Pogosian L, et al. Dynamical dark energy in light of the latest observations. *Nat Astron*, 2017, 1: 627–635
- 20 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*, 2018, arXiv: 1801.03043
- 21 Zhao G B, Li B, Koyama K. N-body simulations for $f(R)$ gravity using a self-adaptive particle-mesh code. *Phys Rev D*, 2011, 83: 044007
- 22 Zhao G B, Li B, Koyama K. Testing general relativity using the environmental dependence of dark matter halos. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 071303
- 23 Zhao G B, Saito S, Pecival W J, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Weighing the neutrino mass using the galaxy power spectrum of the CMASS sample. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 436: 2038–2053

赵公博



中国科学院国家天文台研究员. 2007 年于中国科学院高能物理研究所获博士学位. 2007~2012 年先后在加拿大 Simon Fraser 大学和英国 Portsmouth 大学从事博士后研究. 2012 年入选国家青年千人计划, 2016 年获得英国皇家学会牛顿高级学者基金. 研究领域为暗能量和引力的宇宙学检验以及宇宙大尺度结构巡天. 2017 年, 带领 Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) 国际合作组发现暗能量动力学的观测证据, 此成果入选 2017 年度中国十大天文学进展.

Summary for “暗能量和加速膨胀的宇宙”

Progress in understanding the cosmic acceleration

Gongbo Zhao

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

E-mail: gbzhao@nao.cas.cn

Unveiling the physics behind the accelerating expansion of the Universe, which was discovered in 1998, is one of the most challenging tasks in modern sciences. In theory, the cosmic acceleration may result from the fact that approximately two thirds energy density of the Universe is provided by Dark Energy, a yet unknown energy component, or imply that general relativity, the most successful theory of gravity within the solar system established by Einstein, may need to be extended on cosmological scales.

In principle, the scenarios of dark energy and modified gravity can yield identical cosmic expansion history, but predict different structure growth. Therefore, this “dark degeneracy” can be broken by studying the evolution history of the cosmic structure with large galaxy surveys. Galaxy surveys is one of the key probes for dark energy and gravity, which can be used to reconstruct the history of cosmic expansion and structure growth using baryonic acoustic oscillations (BAO) and redshift space distortions (RSD) respectively.

BAO is a specific three-dimensional clustering pattern of galaxies due to interactions between photons and baryons in the early Universe. Back in the early cosmic epochs, photons scattered with electrons and electrons interacted with protons, making photons and protons (baryonic matter) “glued” together. There are two opposite forces exerting on this tightly coupled plasma: the pressure of photons and gravity acting on baryons. Similar to what happens to a vibrating spring vertically fixed on the ground, the photon-baryon plasma underwent “Baryonic Oscillations”, propagating waves in the same way as the sound does. Therefore, this physical process is called Baryonic Acoustic Oscillations. The effect of the BAO is to push galaxies apart until at a specific time, called the cosmic recombination, when the temperature of the Universe becomes so low that no more photon-baryon interaction can happen. Since then, the separation among galaxies is “frozen” at a characteristic scale, which is about 150 Mpc depending on the energy content of the Universe, making it a “standard ruler” to be used to infer the expansion history of the Universe, thus BAO is one of the key probes for the nature of dark energy.

RSD is another special three-dimensional clustering pattern of galaxies, but it is due to local motions of the galaxies under gravity. Suppose galaxies only co-move with the cosmic background without moving locally, the clustering of galaxies should be isotropic, in other words, there are same number of galaxy pairs along or across lines of sight of the observer. However, this is not the case in the real world. Galaxies move towards nearby galaxies due to gravity, thus they have “peculiar velocities”. As we infer galaxies’ positions from their line-of-sight velocities in astronomy, the peculiar velocities can distort galaxies’ positions, which results in a distortion, called Redshift Space Distortions, in the 3D clustering of galaxies. RSD plays a key role in cosmology as it can directly be used to infer the nature of gravity (remember the peculiar motion is caused by gravity!).

The Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) program, part of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS)-III project, is the largest completed galaxy survey in the world. BOSS has enabled us to investigate dark energy and gravity to a unprecedented precision, which has implied a 3.5 sigma evidence for the dynamics of dark energy. Ongoing and forthcoming galaxy surveys including the extended Baryonic Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS), Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) and Prime Focus Spectrograph (PFS), will be able to probe the Universe at higher redshifts with much higher precision, which will be providing key observational support for the study of cosmic acceleration.

dark energy, modified gravity, large scale galaxy survey, baryonic acoustic oscillations, redshift space distortions

doi: 10.1360/N972018-00243