



精确宇宙学

范祖辉*

北京大学物理学院天文系, 北京 100871

* E-mail: fanzuhui@pku.edu.cn

收稿日期: 2011-09-07; 接受日期: 2011-10-11; 网络出版日期: 2011-11-25

国家自然科学基金(批准号: 11033005)

摘要 高精度微波背景观测, 加之大尺度结构, 超新星等观测的快速发展, 引领宇宙学进入精确宇宙学时代. 我们对于宇宙的理解不再停留在定性描述阶段, 而是进入了高精度定量测量阶段. 本文将对重要宇宙学观测给出介绍, 并对研究现状, 及未来挑战等给出讨论.

关键词 精确宇宙学, 暗能量, 微波背景辐射, 大尺度结构, 超新星

PACS: 98.80.-k, 95.36+x, 98.70.Vc, 98.62.Py, 97.60.Bw

1 引言

四百余年前, 望远镜的发明开启了人类探索肉眼视野以外的天空的征程, 对于人们正确认知太阳系起到了巨大的推动作用^[1]. 而进入 20 世纪以来, 科学技术的高速发展, 使得我们可以以科学的手段探索宏大的宇宙, 从而使宇宙学进入了科学的领域. 20 世纪初, 依据分辨出的造父变星, 哈勃测量了地球至仙女座星系的距离, 平息了对于所谓螺旋星云(Spiral Nebula)是银河系内结构还是河外结构的辩论, 明确了它们是在银河系以外并与银河系类似的星系结构^[2]. 这一结果极大地拓展了我们对于宇宙的认识, 奠定了宇宙学的认知基础. 几乎同时, 对于临近星系的观测, 哈勃发现它们普遍呈现退行现象, 且退行速度与星系距地球的距离成正比关系^[3]. 这一哈勃膨胀规律可以在宇宙膨胀的框架下得到自然的解释, 因此被认为是宇宙膨胀演化的最重要的观测基石. 另一方面, 爱因斯坦广义相对论的建立奠定了宇宙学研究的理论基础, 使得我们可以将宇宙作为一个动

力学系统, 研究其演化过程^[4,5]. 20 世纪 40 年代, 针对元素起源问题, 伽莫夫等人提出了大爆炸宇宙学. 在这一框架下, 宇宙早期处于高温高密状态, 随着宇宙膨胀, 温度, 物质密度下降. 当温度降至约 0.1 MeV 时, 发生原子核合成过程, 主要产物为氦 $4(^4\text{He})$ ^[6]. 这一理论有一重要预言, 即宇宙应该存在一背景辐射场, 其典型温度为几 K, 主要能量分布在微波波段, 称为微波背景辐射. 20 世纪 60 年代, 宇宙微波背景辐射首次被发现, 这极大地促进了大爆炸宇宙学的发展, 使其逐渐成为标准宇宙学模型^[7,8]. 对于大爆炸宇宙学的深入研究表明该理论存在若干致命的问题, 如平坦性问题, 视界问题等. 70 年代末 80 年代初暴涨宇宙学的提出, 在很大程度上唯象地解决了这些问题, 但暴涨过程自身的物理机制仍待进一步研究^[9].

就宇宙间物质组成而言, 暗物质、暗能量问题的提出是 20 世纪宇宙学的重大发现与发展. 对于星系团, 星系及宇宙大尺度结构的动力学研究和引力透镜研究等, 发现宇宙间应存在大量不发光的暗物

引用格式: 范祖辉. 精确宇宙学. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1367–1377

Fan Z H. Precision cosmology (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 1367–1377, doi: 10.1360/132011-971

质, 其提供巨大的引力, 使得星系, 星系团等结构得以稳定存在, 使得大尺度结构形成时间与观测相符合^[10-12]. 至 20 世纪 80 年代, 暗物质的存在已被广泛接受, 含有暗物质的宇宙学模型成为标准宇宙学模型, 结合暴涨宇宙学预言, 则期待宇宙暗物质密度应非常接近宇宙临界密度^[13]. 另一方面, 对于大尺度结构等观测研究表明今天宇宙间暗物质成分应仅占宇宙临界密度的约 30%! 其余的约 70% 是什么? 20 世纪 90 年代初期至中期, 人们已指出若以宇宙学常数去弥补其余~70%的成分, 则与各种宇宙学观测相符合^[14,15]. 需要指出的是, 宇宙学常数最早提出源于爱因斯坦, 为了使宇宙处于静止状态, 其在广义相对论中加入宇宙学常数项, 这一项提供了等效的斥力, 与物质的引力相平衡, 可以得出宇宙的静态解^[5]. 哈勃膨胀规律的发现, 表明宇宙在膨胀, 于是宇宙学常数被放弃. 20 世纪 90 年代末期超新星观测发现宇宙正在加速膨胀, 这一结果正式开启了暗能量的研究^[16,17], 而宇宙学常数便是一种特殊的暗能量^[18]. 随后, 高精度微波背景观测^[19]和大尺度结构观测等^[20]进一步支持了暗能量的存在, 并对于宇宙物质组成给出了精确的测量, 宇宙学研究进入了精确宇宙学阶段. 今天, 我们知道宇宙间暗能量成分占~72%, 暗物质成分占~24%, 而我们熟知的重子物质成分仅占~4%^[19]. 深入研究暗物质, 暗能量性质则成为宇宙学研究的重要目标, 这从观测和理论的角度, 对于精确宇宙学提出了更高的要求^[21].

2 宇宙学观测及相关物理机制

天文学观测在宇宙学的发展进程中, 起着至关重要的推动作用. 本节就与宇宙学研究密切相关的微波背景辐射、大尺度结构、星系团统计、引力透镜、超新星等观测及其与宇宙学的相关性作出简要介绍.

在大爆炸宇宙学的框架下, 背景辐射自然存在. 但在宇宙早期, 物质处于电离状态, 大量的自由电子与光子频繁散射, 造成光子自由程很短, 宇宙处于不透明状态. 当宇宙温度降至约 3000 K 时, 质子与电子复合, 形成氢原子. 由于自由电子急剧减少, 光子自由程大幅增加, 宇宙变得透明, 从而我们得以观测到宇宙背景辐射^[8]. 因此, 我们今天所观测到的宇宙微波背景辐射直接反映了在温度约为 3000 K, 对应年龄为几十万年时的宇宙的性质. 它的观测发现及

高精度黑体谱性质测量表明宇宙早期的确经历了高温高密状态, 强烈支持了大爆炸宇宙学. 它的高度各向同性, 是对宇宙学基本出发点, 即宇宙学原理的极大支持^[22]. 另一方面, 宇宙大尺度结构研究表明, 我们今天所看到的大尺度结构起源于宇宙暴涨时期的量子涨落^[9], 其在物质分布中留下痕迹, 造成物质分布的微小不均匀性. 随着宇宙的演化, 在引力不稳定性作用下, 不均匀性增长, 最终形成大尺度结构. 由于光与物质的耦合及时空性质对光的传播的影响, 这些不均匀性必定会在微波背景辐射中留下印记, 精确测量这些不均匀性能够提供给我们大量的宇宙学信息, 包括物质组成, 暴涨时期的物理等^[23]. 由于其体现了宇宙在年龄仅为几十万年时的性质(宇宙今天的年龄为~140 亿年), 我们期待微波背景辐射上的不均匀性非常弱, 温度涨落幅度仅为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$, 这对观测提出了极大的挑战! 事实上, 20 世纪 60 年代微波背景辐射被发现后, 人们便开始致力于寻找它的不均匀性, 但直至 80 年代末 90 年代初 COBE (Cosmic Background Explorer) 卫星上天后, 才第一次确切地探测到了微波背景辐射温度的不均匀性: 在角度为 $\sim 10^\circ$ 的范围内, 温度涨落为 $\sim 10^{-5}$ ^[24]. 这一结果异常重要, 它不仅强烈支持了结构形成理论, 同时亦打开了微波背景辐射这一宇宙学宝库, 为精确宇宙学的建立奠定了基础. 随后, 多项观测相继展开, 为我们提供了更加精细的微波背景辐射不均匀性图像^[25]. 特别是 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 卫星的成功观测^[26], 向我们展示了全天范围内分辨率约为 13 角分的高精度观测结果, 引领我们进入了精确宇宙学时代. 图 1 显示了 COBE(上)与 WMAP(下)的全天温度不均匀性观测结果, 可以看出, COBE 勾画了大范围内温度起伏轮廓, 而 WMAP 则观测了重要的细节部分, 使得我们可以从中挖掘大量的宇宙学信息.

微波背景辐射理论研究指出, 其各向异性起源于暴涨时期的量子涨落, 随着宇宙演化, 各种物理过程对各向异性产生影响^[23]. 如前所述, 在早期, 宇宙处于电离状态, 光子与自由电子频繁散射, 同时电子与原子核通过库伦作用相连, 从而使得光子-电子-重子强烈耦合在一起, 形成光子-重子流体. 由于光子的贡献, 该流体存在巨大的压强, 扰动以声波形式存在. 当宇宙温度下降至约 3000 K, 光子退耦时, 其温度分布携带着当时声波振荡的状态. 因此从所观测

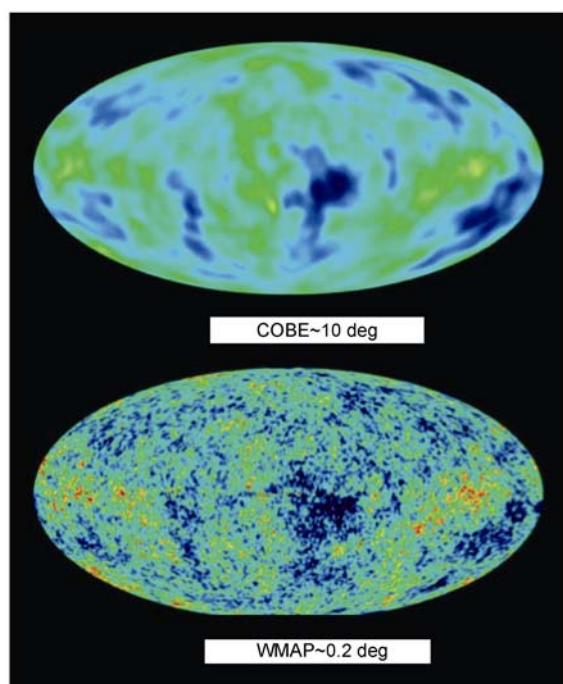


图 1 (网络版彩图) COBE 和 WMAP 观测的微波背景辐射温度各向异性全天图(<http://map.gsfc.nasa.gov>)

Figure 1 (Color online) Full-sky maps of CMB temperature fluctuations from COBE and WMAP. <http://map.gsfc.nasa.gov>.

到的微波背景辐射, 便能够提取与之相关的物理信息, 如重子含量多少等. 另一方面, 对于超过当时声波视界尺度的扰动, 其基本不受声波振荡的影响, 因此直接反映了暴胀时期的物理过程^[23]. 图 2 显示了 WMAP 七年观测数据测得的微波背景辐射温度各向异性角功率谱, 其中上横轴 l 为球谐展开多极矩, 下横轴为其对应的角尺度, 其中 $\theta(^{\circ}) \sim 180/l$. 纵轴为温度扰动功率谱, 它反映了不同尺度扰动强度. 有误差棒的点为观测数据, 实线为最佳拟和的宇宙学模型所给出的理论结果. 我们看到在 $\theta \leq 1^{\circ}$ ($l \geq 180$) 时, 功率谱呈现振荡行为, 这反映了声波振荡特征. 其中第一个峰所在角度约为 $\theta_s \cong 1^{\circ}$, 其对应于光子退耦时的声速视界 r_A (其大小与重子物质含量密切相关), 相应的声波振荡波长为两倍的声速视界, 而更小尺度的峰则对应于高频振荡信号. 这里需要指出, 当将物理线尺度转化为角尺度时, 需要距离的信息. 针对微波背景辐射, 我们有 $\theta_s(^{\circ}) = (180/\pi)(r_s/D_A)$, 这里 D_A 为光子退耦后传播至观测者所经过的角直径距离, 其与宇宙几何性质密切相关, 而后者决定于宇宙物质组

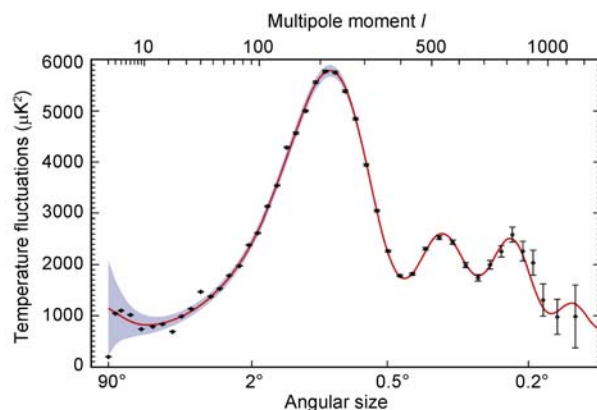


图 2 (网络版彩图) WMAP7 微波背景辐射温度各向异性功率谱(http://map.gsfc.nasa.gov/media/111133/111133_7yr_PowerSpectrumM.jpg)

Figure 2 (Color online) The angular power spectrum of the CMB temperature fluctuations from WMAP7. http://map.gsfc.nasa.gov/media/111133/111133_7yr_PowerSpectrumM.jpg.

成. 功率谱中峰值的高低取决于重子物质多少, 暗物质多少等. 由此看到, 通过精确测量功率谱中峰值的位置及高度, 我们可以得到大量的宇宙学信息. 对于大尺度扰动 $\theta > 1^{\circ}$ ($l < 180$), 声波信息来不及传播, 其主要反映了暴胀时期扰动的性质. 另一方面, 光在从退耦开始传播至观测者的漫长的过程中, 会受到沿途的物理过程的影响. 特别是如果引力势随时间变化, 则会在大尺度扰动上留下痕迹. 所以大尺度扰动含有原初扰动及传播过程中所受影响的信息^[23].

如前所述, 微波背景辐射所携带的扰动信息主要反映了宇宙早期扰动很小时的状态. 这些扰动随宇宙演化而增长, 形成物质分布的大尺度结构. 因此, 观测大尺度结构则能够告诉我们扰动增长的过程, 它与宇宙物质组成及性质和宇宙演化规律密切相关^[27]. 利用星系的空间分布作为大尺度结构的示踪物是大尺度结构研究的最重要手段之一, 这需要大规模星系巡天^[28]. 星系在天球上的角位置可以直接观测, 这揭示给我们星系二维空间分布的性质. 观测星系红移, 利用宇宙学距离—红移关系, 则能够得到星系在视线方向至我们的距离, 这样便能够得到星系三维空间分布. 最早的星系红移巡天始于 20 世纪 70 年代后期, 即 CfA (Center for Astrophysics Redshift Survey) 巡天^[29]. 图 3 显示了 CfA 巡天第一张图片, 这里星系的数目仅为约 1100 个^[30]. 这一结果使得人们首次对于宇宙物质分布大尺度结构有了直观的认识:

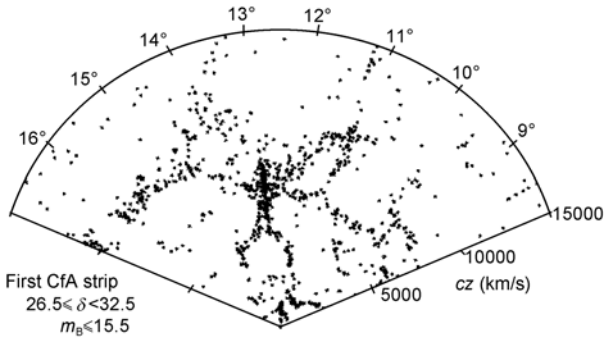


图3 CfA 星系红移巡天第一幅星系空间分布图(<https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/zcat/>)

Figure 3 The distribution of galaxies from the first slice of the CfA survey. <https://www.cfa.harvard.edu/~dfabricant/huchra/zcat/>.

星系不是随机分布在空间中,而是形成各种结构.有些地方星系非常少,形成空洞结构,而星系聚集区则形成所谓“星系长城”的结构.随后多项星系红移巡天相继展开,为我们提供了越来越精细的大尺度结构图像^[31].其中,SDSS 在约一万平方度的天区内,测量了约一百万个星系的红移,平均红移深度约为 $z=0.1$,同时对于约十万个平均红移约 $z=0.35$ 的亮红星系的测量,使得我们可以研究不同红移处的大尺度结构^[32].另有其他针对相对较小天区的高红移星系巡天项目已将大尺度结构的研究拓展至 $z \sim 1$ ^[33,34].图4显示了围绕天球赤道 10° 范围内的 SDSS 星系分布图,其中黑点为主星系样本,红点为亮红星系样本

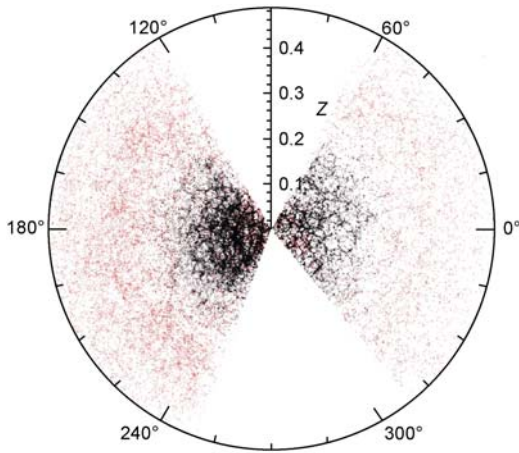


图4 (网络版彩图) SDSS 观测的星系空间分布图(<http://howdy.physics.nyu.edu/index.php/File:Sdss-pie.jpg>)

Figure 4 (Color online) The distribution of galaxies from SDSS. <http://howdy.physics.nyu.edu/index.php/File:Sdss-pie.jpg>.

本.图5显示了SDSS 亮红星系空间分布功率谱,其中 k 为空间傅里叶波矢,带有误差棒的点为数据点,红线与绿线分别对应不同的宇宙学模型给出的结果^[20].可以看出,目前的数据已能够对于功率谱给出高精度测量,从中我们可以得到丰富的宇宙学信息.图5中的插图显示了功率谱具有振荡行为,其与微波背景辐射温度各向异性功率谱中的振荡行为有着相同的起源,是宇宙早期光子-重子流体声波振荡在重子物质中留下的痕迹的体现,通过引力作用,这种振荡特征被传递给整体物质分布,这称作重子声波振荡(Baryonic Acoustic Oscillation, BAO).利用不同红移处的星系分布及功率谱分析,我们可以得到在不同红移处的重子声波振荡特征.需要指出的是利用观测到的角位置和红移计算距离时,我们要知道角直径距离和哈勃参量.因此根据微波背景辐射观测对于声波振荡物理尺度的定标,我们便可以利用 BAO 特征得到不同红移处的角直径距离和哈勃参量信息,其与宇宙学密切相关.

除星系空间分布外,星系团也可以作为大尺度结构的示踪物.作为宇宙间最大的维里化结构,其形成与演化敏感地依赖于宇宙学^[35].与星系不同,星系

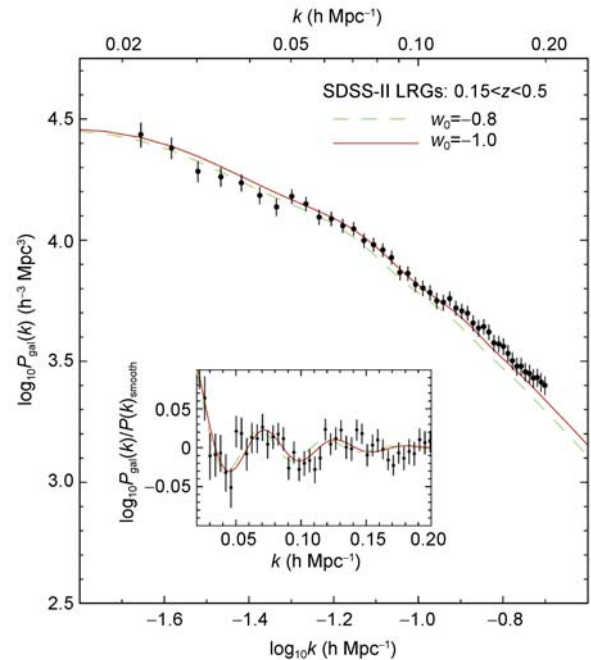


图5 (网络版彩图) SDSS 观测的亮红星系空间分布功率谱(<http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>)

Figure 5 (Color online) The power spectrum of Luminous Red Galaxies from SDSS. <http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>.

团的形成与演化主要取决于引力作用, 因此物理过程相对简单, 同时, 我们拥有多种探测星系团的手段, 包括星系团富度分析^[36], X-射线观测^[37], Sunyave-Zeldovich(SZ)效应观测^[38], 引力透镜观测等^[39]. 星系团丰度及随红移的演化是宇宙学研究的主要手段之一, 其空间分布, 如两点相关函数等亦含有重要的宇宙学信息. 另一方面, 由于星系团数目相对于星系而言少很多, 在相关分析中将会有更大的统计误差. 对于丰度分析, 我们需要从可观测量转化为质量, 而后利用质量函数进行宇宙学研究, 这种转化含有众多的误差因素, 成为利用星系团进行宇宙学研究的重要问题所在. 利用引力透镜手段测得星系团质量, 进而得到观测量-质量关系是解决转化问题的手段之一, 但引力透镜分析自身亦含有许多误差因素. 另一方法是自校正方法, 即将观测量-质量关系与宇宙学参数放在等同的位置, 利用观测数据同时进行限制, 这需要对样本中部分星系团进行更加细致的观测. 图 6 显示了 South Pole Telescope (SPT) 利用 SZ 效应探测到的 18 个星系团的数目——红移分布, 不同的实线为不同的宇宙学模型的预言^[40]. 可以看出, 目前的星系团数据仍非常有限, 尽管如此, 其对限制宇宙学参数已有显著的贡献. 未来大型观测将会大大增加星系团样本, 其统计分析将会成为重要的宇宙学研究手段之一.

宇宙学研究的另一个重要手段是引力透镜效应, 特别是弱引力透镜效应. 宇宙大尺度结构对光的传播路径产生引力偏折, 造成所观测到的背景星系形

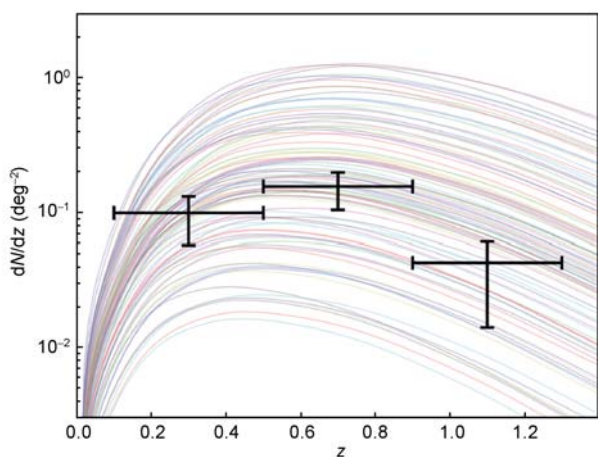


图 6 (网络版彩图) SPT 观测的 SZ 星系团丰度分布^[40]
Figure 6 (Color online) The redshift distribution of the SZ cluster abundance from SPT [40].

状相对于其固有形状有微小改变(称作剪切)和光度的放大^[39]. 弱引力透镜效应是探测宇宙间暗物质分布的最直接手段, 同时它亦敏感地依赖于宇宙几何性质, 从而也成为暗能量研究的主要方法之一. 图 7 显示了 Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS) 观测所给出的弱引力透镜透镜剪切相关函数, 其中红色和黑色分别对应 *E*-模式和 *B*-模式数据, 弱引力透镜理论期待应只存在 *E*-模式信号^[41]. 相对于微波背景观测和星系大尺度结构观测, 目前的弱引力透镜观测数据对宇宙学研究的贡献仍然有限, 但在正在进行及未来的诸多大型观测计划中, 弱引力透镜研究是主要的科学目标之一, 我们期待该方面的研究将会有长足的发展.

上述宇宙学观测手段均涉及宇宙物质分布不均匀性及其演化, 另一方面, 利用 Ia 型超新星观测出距离, 进而利用距离-红移关系进行宇宙学研究则主要涉及宇宙整体的膨胀规律^[16,17]. Ia 型超新星的爆发机制与双星系统演化密切相关: 当其中一质量较大的恒星演化为致密白矮星后, 在其强大的引力作用下, 伴星的物质被吸引. 当白矮星质量超过电子简并压对应的 Chandrasakar 极限后, Ia 星超新星爆发^[42]. 研究表明, 该类超新星爆发后其光变曲线具有相似的行为, 如在亮度达到峰值后的下降速度与峰值亮度具有很好的相关性, 下降越快, 峰值亮度越低^[16]. 考虑这些相关因素后, Ia 型超新星光变曲线具有非常

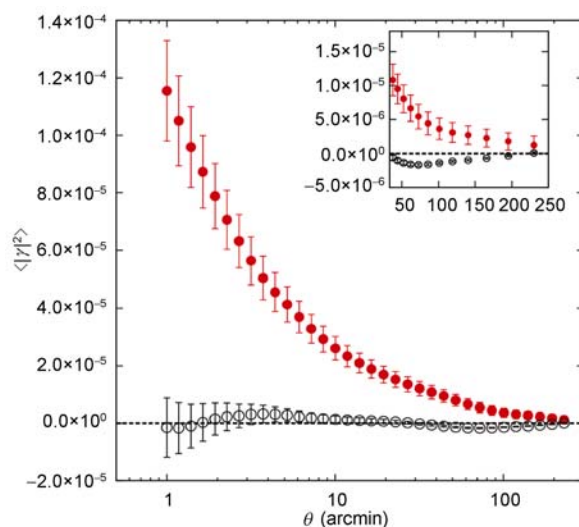


图 7 (网络版彩图) CFHTLS 观测的宇宙剪切功率谱^[41]
Figure 7 (Color online) The power spectrum of cosmic shear from CFHTLS [41].

高的一致性, 从而成为非常好的标准烛光, 可以用来测量宇宙学距离. 其巨大的爆发能量, 使得人们可以探测到高红移处的超新星, 因此 Ia 型超新星成为宇宙学研究最有效的探针之一, 事实上, 正是 20 世纪 90 年代末 Ia 型超新星的观测带来了暗能量研究时代, 随后, 多项超新星观测计划相继展开. 图 8 显示了目前超新星观测所得到的距离-红移关系, 其中纵轴为超新星视星等, 其与光度距离的对数直接相关^[43]. 不同数据来源标为不同颜色, 实线为最佳拟和的宇宙学模型所给出的结果, 其中下图显示了数据点与最佳模型的差值. 我们看到, 从最初的几十颗到目前近千颗观测, 利用 Ia 型超新星进行宇宙学研究已走向成熟, 成为精确宇宙学的主要贡献者.

3 精确宇宙学研究现状

随着现代天文观测技术的飞速发展, 宇宙学研究已经从极度缺乏数据的状态发展为具有海量观测数据的状态, 使得精确宇宙学研究成为可能. 今天, 我们不仅能够定性地描述宇宙的状态, 更能够在百分之几的程度上对于重要宇宙学参数给出限制, 这是人类对宇宙认知的巨大飞跃, 其重要性不言而喻. 在 2010 年末, 美国《科学》杂志评选出过去十年各学科最重要的科学进展, 精确宇宙学榜上有名^[44].

在爱因斯坦广义相对论框架下, 宇宙的演化依赖于宇宙物质组成与性质, 具体地, 我们可以用 Ω_M , Ω_r , Ω_{DE} , ω 来描述, 其中 Ω_M , Ω_r , Ω_{DE} 分别为以宇宙临界密度为单位的今天的宇宙物质密度, 辐射成分的

能量密度和暗能量密度, ω 为暗能量物态方程参数, 满足 $P_{DE} = \omega \rho_{DE}$, 这里 P_{DE} , ρ_{DE} 分别为暗能量等效压强和能量密度. 物质部分包含暗物质和重子物质成分, 就宇宙整体演化动力学而言, 两种物质成分没有差别. 对于辐射部分, 其今天占有的能量密度非常小, 可以忽略, 但在宇宙演化早期, 辐射成分对宇宙演化起着重要的作用. 对于物质部分, 压强可以忽略, $\rho_M \propto (1+z)^3$, 对于辐射部分, $P_r = \rho_r/3$, $\rho_r \propto (1+z)^4$. 对于暗能量部分, 当 ω 为常数时, $\rho_{DE} \propto (1+z)^{3(1+\omega)}$, 对于宇宙学常数, $\omega = -1$, P_{DE} 为常数. 与观测相关的宇宙学距离, 如 Ia 型超新星观测所给出的光度距离, 依赖于这些宇宙学参数, 因此通过观测所得到的距离-红移关系, 便能够对 Ω_M , Ω_r , Ω_{DE} , ω 给出限制.

另一方面, 宇宙大尺度结构的形成与演化亦与宇宙演化规律密切相关, 同时, 暗物质性质直接影响结构的增长, 因此上一节所述的与结构形成相关的观测, 亦能够对于宇宙学参数给出限制. 同时, 大尺度结构的形成和演化依赖于原初扰动性质, 后者涉及的重要参数有原初扰动幅度, 原初扰动功率谱谱指数等. 精确宇宙学的主要目的则是利用宇宙学观测, 对这些重要参数, 包括宇宙学参数和原初扰动参数等给出准确的限制, 从而深入理解这些参数背后的物理过程.

图 9 显示了目前的观测对于宇宙学参数的限制, 其中宇宙学常数作为暗能量成分, 记为 Ω_Λ , 这被称为 Λ CDM 宇宙学模型, 这里 Λ 表示宇宙学常数, CDM 表示冷暗物质为主 (Cold Dark Matter)^[45]. 图中 SNe 表示来自 Ia 型超新星的限制, CMB 表示来自微波背景各向异性观测的限制, BAO 表示来自大尺度结构重子声波振荡信号的限制. 我们看到: (1) 各种宇宙学观测能够对宇宙学参数给出明确的限制; (2) 不同观测给出的限制高度吻合, 这对于宇宙学研究至关重要, 强烈支持了 Λ CDM 宇宙学模型; (3) 每一宇宙学观测给出的限制均是有限的, 宇宙学参数存在明显简并现象. 而将不同观测给出的限制相结合, 则可打破参数简并, 对 Ω_M , Ω_Λ 给出精确限制, 这充分表明了利用多项观测进行宇宙学研究的重要性. 结果显示, 今天的物质组成为 $\Omega_M = 0.278^{+0.014}_{-0.014}$, $\Omega_k = 1 - \Omega_M - \Omega_\Lambda = -0.003^{+0.006}_{-0.006}$, 这里 Ω_k 为宇宙空间曲率贡献的等效能量密度. 可以看出 $\Omega_k = 0$ 与观测非常符合, 而对于物质成分的限制已达到 ~5% 的精度.

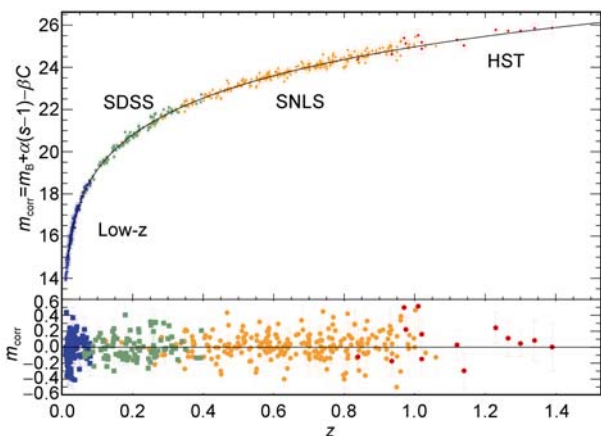


图 8 (网络版彩图) Ia 型超新星观测所给出的哈勃图^[43]
Figure 8 (Color online) The Hubble Diagram from Supernova Type Ia observations [43].

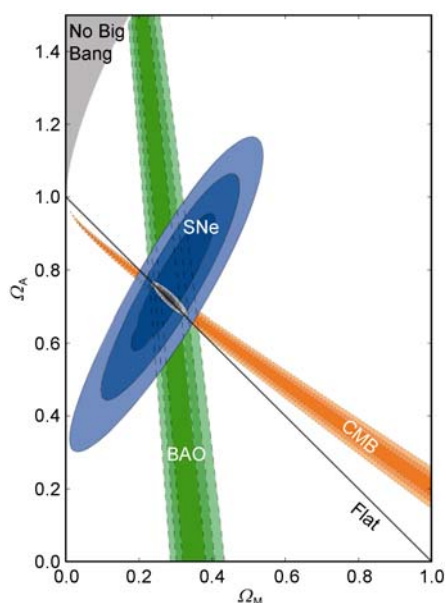


图9 (网络版彩图) 在 Λ CDM宇宙学模型下所得到的宇宙学参数限制^[45]

Figure 9 (Color online) Constraints on the cosmological parameters of Λ CDM models [45].

宇宙学常数作为暗能量的宇宙学模型与观测非常符合, 另一方面, 其存在着严重的理论困难, 即精细调节问题和巧合问题^[18]. 前者涉及的问题是 Ω_Λ 的取值, 观测所给出的限制比粒子物理理论预言的真空能密度小 $\sim 10^{120}$! 什么机制能够在如此高的精度上抵消掉真空能密度从而给出所需 Ω_Λ ? 后一个问题则是: 既然宇宙学常数不变, 而 $\rho_M \propto (1+z)^3$, 为什么刚

好在今天, 物质含量与暗能量含量相当? 针对这些问题, 动力学暗能量模型被广泛考虑, 在这些模型中, 暗能量密度不再是常数, 而是随宇宙演化而变化, 从而在一定程度上缓解了宇宙学常数的问题. 但目前动力学暗能量模型的研究仍处于唯象阶段. 在流体描述中, 状态方程参数 ω 是一重要物理量, 其不同行为反映了不同的暗能量性质, 而利用宇宙学观测精确限制 ω 则是当前及未来暗能量研究的主要目标. 在该方面, 我国宇宙学工作者做了大量的工作^[46-48]. 特别地, 我国研究者自恰地考虑了动力学暗能量扰动, 并将其结合进已有的计算程序中, 从而建立了一套包含暗能量扰动的利用多种宇宙学观测数据限制宇宙学参数的计算平台, 据此做了大量的暗能量研究工作, 得到国际同行的广泛重视^[49]. 图 10 显示了对于暗能量状态方程的限制, 其中设 $\omega(z) = \omega_0 + \omega_a z/(1+z)$. 在图 10(a)中, 红实线为假设平坦宇宙时所得到的限制, 蓝断线为不加这一前提时所得到的限制, 可以看出, 此时对于暗能量的限制放宽. 黑断线为错误地忽略掉暗能量扰动时给出的限制(平坦宇宙), 比较红实线, 可以看出正确考虑暗能量扰动的重要性. 我们看到左、右两图给出非常一致的结果, 尽管右图使用了 WMAP7 数据和更新的超新星数据. 从图 10(b), 我们再一次看到结合多项宇宙学观测数据的重要性. 该结果表明目前的观测数据与 Λ CDM模型很好地符合, 同时已能对暗能量性质给出相当的限制, 在 (ω_0, ω_a) 上排除了很大范围, 但仍有很大的允许区域. 而未来的宇宙学观测的重要任务则是

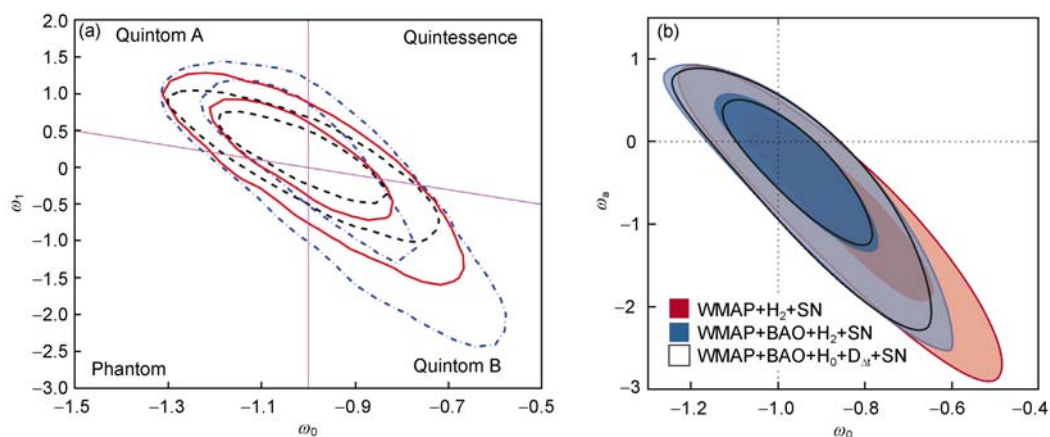


图 10 (网络版彩图) 目前宇宙学观测所得到的对于暗能量物态方程参数的限制.

(a) 来自文献[46]; (b) 来自文献[19]

Figure 10 (Color online) Constraints on the equation-of-state parameters of dark energy from current observations. (a) Ref. [46]; (b) ref. [19].

提高限制精度, 从而更好地理解暗能量的物理机制.

需要指出的是, 除暗能量外, 宇宙学观测对其他重要参数, 如原初扰动参数, 中微子质量等也给出了重要限制^[19]. 同时, 人们亦尝试利用观测数据探索新物理, 如由我国研究者首次提出的 CPT 破坏等^[50].

4 未来前景与挑战

宇宙学研究已取得了长足的激动人心的进展, 但仍有许多未解决的问题, 其中暗能量性质问题则是最重要的问题之一^[21]. 众多正在进行的或未来的大型观测计划的实施将会大大改进我们对于暗能量的认知, 这些大型项目包括 Planck^[51], DES^[52], Pan-STARR^[53], LSST^[54], Euclid^[55], 及我国南极天文观测计划^[56]等. 图 11 显示了对于未来暗能量研究的预期^[57]. 图中灰色区域为目前观测所给出的 1σ 和 2σ 限制, 白叉符号显示了目前数据给出的最佳拟和值, 在这里作为对未来观测预期的参考模型. 蓝色区域显示了结合 JDEM^[58]超新星预期, Planck 微波背景观测, 和 LSST 大尺度结构和弱引力透镜观测的结果, 黄色区域与蓝色区域的差别为考虑了影响大尺度结构和弱引力透镜效应的部分系统误差. 红星符号为宇宙学常数模型, 可以看出其虽然与最佳拟和值有所偏离, 但在现在的观测数据给出的限制精度下, 我们完全不能判断两个模型的好坏, 宇宙学常数模型亦与观测数据高度吻合. 而如果暗能量模型的确是

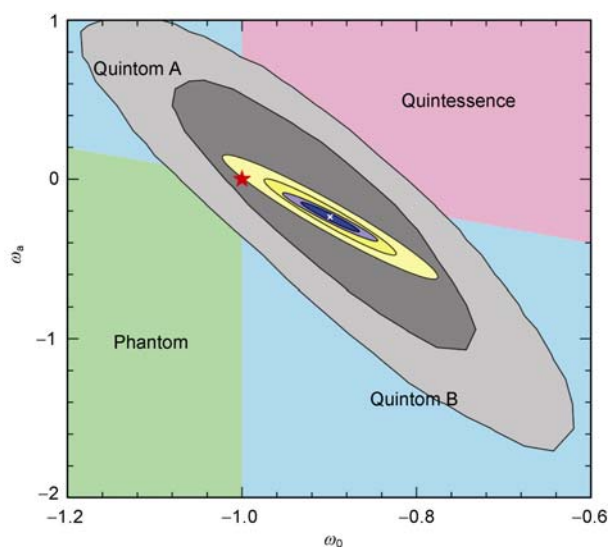


图 11 未来观测所给出的暗能量限制的预期^[57]

Figure 11 Expected constraints on the equation-of-state parameters of dark energy from future observations.

现在的最佳拟和模型, 未来的观测则有望排除宇宙学常数模型, 这将是暗能量研究的重大突破.

然而, 未来的研究中充满着各种挑战. 除去大型观测项目自身的设计、建造、数据管理及分析等, 各种系统误差因素将成为制约未来观测宇宙学研究的最主要因素^[21], 图 11 中黄色与蓝色区域的差别则展示了部分系统误差的影响. 系统误差研究远比统计误差分析复杂, 涉及观测因素, 物理因素等, 而深入

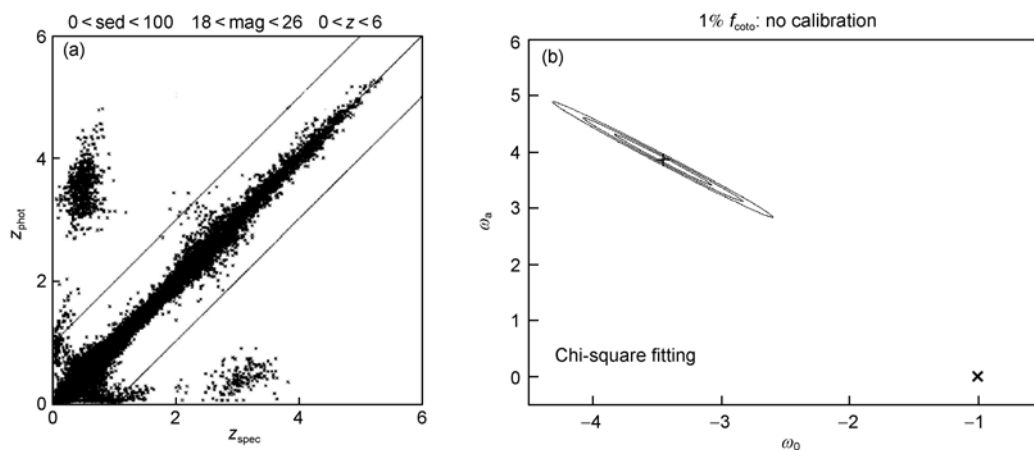


图 12 灾难性测光红移误差对弱引力透镜暗能量研究的影响^[59]

(a) 显示了一个测光红移模拟结果; (b) 灾难性误差对于未来弱引力透镜暗能量研究的影响

Figure 12 Effects of catastrophic errors of photometric redshifts on weak-lensing cosmological studies. (a) A simulation of photometric redshift measurements for galaxies; (b) effects of catastrophic errors on future weak-lensing dark energy studies.

了解各种可能的系统误差及对于观测数据分析和宇宙学研究的影响已称为宇宙学研究重要的前沿. 系统误差不同于统计误差, 它不仅仅影响限制精度, 更有可能对宇宙学参数限制带来整体偏差. 作为一个例子, 图 12 显示了所谓测光红移灾难性误差对弱引力透镜宇宙学研究的影响^[59]. 在弱引力透镜研究中, 背景星系的红移信息非常重要. 然而对于大量红移 $z \sim 1$ 的星系进行光谱红移测量非常困难, 而利用多波段测光观测, 借助于星系连续谱特征, 亦可对星系的红移给出估计, 这称为测光红移, 其已成为弱引力透镜宇宙学研究中的重要组成部分. 但是测光红移不准确, 有时利用测光估计的红移会远远偏离真实值, 这与测光波长范围, 波段数, 测光精度, 对星系物理的理解等诸多因素相关. 图 12(a)显示了一个测光红移模拟结果, 其中横轴为星系真实红移, 纵轴为测光

红移. 我们看到, 大部分测光红移与真实红移相符合, 但存在弥散. 然而部分测光红移完全定错, 这称为灾难性误差. 图 12(b)显示了 12(a)中左上部分的灾难性误差对于未来弱引力透镜暗能量研究的影响, 特别考虑了其造成的整体偏差效应. 图中右下角的叉号为输入的参考模型, 而由于测光红移误差, 拟和出的暗能量状态方程参数为左上方的轮廓区域, 这完全偏离了输入的模型, 注意这里假设所考虑的灾难性误差的存在比例仅为 1%! 这一结果表明我们必须克服测光红移误差, 才能够给出精确的宇宙学限制.

另一方面, 正是由于各种挑战的存在, 才使得宇宙学研究充满活力与机遇. 在见证了近三十年来宇宙学的发展后, 我们期待在未来的几十年间, 宇宙学将会有更加深入的进展, 从而引领我们更加透彻地理解宇宙, 包括暗能量、暗物质的本质.

参考文献

- 1 李政道. 以天之道, 解物之道. 物理, 2008, 37: 831–835
- 2 Hubble E. Cepheids in spiral nebulae. Observatory, 1925, 48: 139–142
- 3 Hubble E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proc Nat Acad Sci USA, 1929, 15(3): 168–173
- 4 Einstein A. Die Feldgleichungen der Gravitation. Berlin: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1915. 844–847
- 5 Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie. Berlin: Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften, 1917. 142–152
- 6 Alpher R A, Bethe H, Gamov G. The origin of chemical elements. Phys Rev, 1948, 73(7): 803–804
- 7 Penzias A A, Wilson R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080Mc/s. Astrophys J, 1965, 142: 419–421
- 8 Dicke R H, Peebles P J E, Roll P G, et al. Cosmic black-body radiation. Astrophys J, 1965, 142: 414–419
- 9 Liddle A, Lyth D. Cosmological Inflation and Large-Scale Structure. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 10 Zwicky F. On the masses of nebulae and of clusters of nebulae. Astrophys J, 1937, 86: 217
- 11 Sofue Y, Rubin V. Rotation curves of spiral galaxies. Annu Rev Astron Astrophys, 2001, 39: 137–174
- 12 Ostriker J P. Astronomical tests of the cold dark matter scenario. Annu Rev Astron Astrophys, 1993, 31: 689–716
- 13 White S D M, Davis M, Efstathiou G, et al. Galaxy distribution in a cold dark matter universe. Nature, 1987, 330: 451–453
- 14 Krauss L M, Turner M S. The cosmological constant is back. Gen Relat Gravit, 1995, 27(11): 1137–1144
- 15 Efstathiou G, Sutherland W J, Maddox S J. The cosmological constant and cold dark matter. Nature, 1990, 348: 705–707
- 16 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. Astron J, 116(3): 1009–1038
- 17 Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. Astrophys J, 1999, 517(2): 565–586
- 18 Frieman J A, Turner M S, Huterer D. Dark energy and the accelerating universe. Annu Rev Astron Astrophys, 2008, 46(1): 385–432
- 19 Komatsu E, Smith K M, Dunkley J, et al. Seven_year wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation. Astrophys J Suppl Ser, 2011, 192: 18–64
- 20 Percival W J, Reid B A, Eisenstein D J, et al. Baryon acoustic oscillations in the sloan digital sky survey data release 7 galaxy sample. Monthly Not R Astron Soc, 2010, 401: 2148–2168
- 21 Albrecht A, Bernstein G, Cahn R, et al. Report of the dark energy task force. arXiv: astro-ph/0609591

- 22 Mather J C, Cheng E S, Eplee Jr R E, et al. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the cosmic background explorer (COBE) satellite. *Astrophys J*, 1990, 354: L37–L40
- 23 Hu W. Wandering in the Background: A Cosmic Microwave Background Explorer. Dissertation for the Doctoral Degree. Berkeley: University of California, 1995
- 24 Smoot G F, Bennett C L, Kogut A, et al. Preliminary results from the COBE differential microwave radiometers: Large-angular-scale isotropy of the cosmic microwave background. *Astrophys J*, 1991, 371: L1–L5
- 25 Hu W, Dodelson S. Cosmic microwave background anisotropies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2002, 40: 171–216
- 26 <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- 27 Springel V, White S D M, Jenkins A, et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 2005, 435: 629–636
- 28 York D G, Adelman J, Anderson J E Jr, et al. The sloan digital sky survey: Technical summary. *Astron J*, 2000, 120(3): 1579–1587
- 29 Huchra J, Davis M, Latham D, et al. A survey of galaxy redshifts. IV–The data. *Astrophys J Suppl Ser*, 1983, 52: 89–119
- 30 Geller M, Huchra J P. Mapping the universe. *Science*, 1989, 246: 897–903
- 31 <http://www.astro.ljmu.ac.uk/~ikb/research/galaxy-redshift-surveys.html>
- 32 <http://www.sdss.org>
- 33 <http://deep.berkeley.edu/>
- 34 <http://cosmos.astro.caltech.edu/>
- 35 Fan Z H, Chiuth T H. Determining the geometry and the cosmological parameters of the universe through sunyaev-zel’dovich effect cluster counts. *Astrophys J*, 2001, 550(2): 547–553
- 36 Hao J G, Mckay T A, Koester B P, et al. A GMBCG galaxy cluster catalog of 55,424 rich clusters from SDSS DR7. *Astrophys J Suppl*, 2010, 191(2): 254–274
- 37 Rosati P, Borgani S, Norman C. The evolution of X-ray clusters of galaxies. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2002, 40: 539–577
- 38 Carlstrom J E, Holder G P, Reese E D. Cosmology with the Sunyaev-Zel’dovich effect. *Annu Rev Astron Astrophys*, 2002, 40: 643–680
- 39 Bartelmann M, Schneider P. Weak gravitational lensing. *Phys Rep*, 2001, 340: 291–472
- 40 Vanderlinde K, Crawford T M, De Hann T, et al. Galaxy clusters selected with the Sunyaev-Zel’dovich effect from 2008 south pole telescope observations. *Astrophys J*, 2010, 722: 1180–1196
- 41 Fu L, Semboloni E, Hoekstra H, et al. Very weak lensing in the CFHTLS wide: Cosmology from cosmic shear in the linear regime. *Astron Astrophys*, 2008, 479: 9–25
- 42 Branch D. Type Ia supernovae and the hubble constant. *Annu Rev Astron Astrophys*, 1998, 36: 17–55
- 43 Conley A, Guy J, Sullivan M, et al. Supernova constraints and systematic uncertainties from the first three years of the supernova legacy survey. *Astrophys J Suppl Ser*, 2011, 192: 1–29
- 44 Cho A. A recipe for the cosmos. *Science*, 2010, 330: 1615
- 45 Amanullah R, Lidman C, Rubin D, et al. Spectra and Hubble Space Telescope light curves of six type Ia supernovae at $0.511 < z < 1.12$ and the Union2 compilation. *Astrophys J*, 2010, 716: 712–738
- 46 Xia J Q, Li H, Zhao G B, et al. Determining cosmological parameters with the latest observational data. *Phys Rev D*, 2008, 78(8): 083524
- 47 Gong Y, Chen X L. Two-component model of dark energy. *Phys Rev D*, 2007, 76(12): 123007
- 48 Gong Y G, Zhu X M, Zhu Z H. Current cosmological constraints on the curvature, dark energy and modified gravity. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 415(2): 1943–1949
- 49 Zhao G B, Xia J Q, Li M Z, et al. Perturbations of the quintom models of dark energy and the effects on observations. *Phys Rev D*, 2005, 72(12): 123515
- 50 Feng B, Li M Z, Xia J Q, et al. Searching for CPT violation with cosmic microwave background data from WMAP and BOOMERANG. *Phys Rev Lett*, 2006, 96(22): 221302
- 51 <http://www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html>
- 52 <http://www.darkenergysurvey.org/>
- 53 <http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu>
- 54 <http://www.lsst.org/>
- 55 <http://sci.esa.int/euclid/>
- 56 <http://www.kdust.org/KDUST/KDUST.html>
- 57 Zhao G B, Zhang X M. Probing dark energy dynamics from current and future cosmological observations. *Phys Rev D*, 2010, 81(4): 043518

- 58 Albrecht A, Amendola L, Bernstein G, et al. Findings of the joint dark energy mission figure of merit science working group. arXiv: astro-ph/0901.0721
- 59 Sun L, Fan Z H, Tao C, et al. Catastrophic photo-z errors and the dark energy parameter estimates with cosmic shear. *Astrophys J*, 2009, 699: 958–967

Precision cosmology

FAN ZuHui^{*}

Department of Astronomy, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China

High precision cosmological observations, including cosmic microwave background anisotropy, large-scale structures of the universe, type Ia supernovae, etc., have opened the era of precision cosmology. Nowadays, our understanding about the universe is far from qualitative sketches, and we can measure important cosmological parameters at the precision of a few percents. In this paper, after describing various cosmological observations and their underlying physics. I will discuss the current status of precision cosmology and its future potentials and challenges.

precision cosmology, dark energy, cosmic microwave background radiation, large-scale structures of the universe, type Ia supernovae

PACS: 98.80.-k, 95.36+x, 98.70.Vc, 98.62.Py, 97.60.Bw

doi: 10.1360/132011-971