



暗能量观测: 现在的状态和未来的发展

陶嘉琳^{①②*}

① 清华大学天体物理中心, 北京 100084;

② 马赛粒子物理中心, 马赛 13288, 法国

*E-mail: taojl@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-09-07; 接受日期: 2011-11-21; 网络出版日期: 2011-11-25

自然科学基金资助项目(批准号: 11173017)

摘要 本文回顾了当前暗能量观测的情况. 最近利用 SNLS-3year 的数据得到了对于宇宙学参数的限制. 本文还探讨了其他探针对于宇宙学参数的限制情况, 特别是一种新的利用星系对之间角分布的探测方法.

关键词 宇宙学参数, 超新星, 暗能量方程

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

1 引言

关于暗能量观测的大量工作是很难仅用几页文字来加以综述的. 在本文第 2 节, 阐述了最近利用 SNLS-3year 数据限制的宇宙学参数, 同时, 还有关于未来利用 SNIa 数据对于宇宙学参数进行更加精细限制的讨论. 第 3 节是对其他情况的简要回顾, 以及由 Christian 和 Adeline^[1]介绍一种新的利用星系对之间角分布的探测方法.

当今的宇宙学观测(CMB, SNIa, BAO, Clusters, Weak and Strong Lensing, Lyman alpha, redshift distortions, galaxy pairs, ...)都符合 Λ CDM 模型, Ω_Λ 大约是 0.7. 因此, 对于宇宙加速膨胀有一个简单的解释: 爱因斯坦方程中的宇宙学常数.

然而, 粒子物理学家对于这个结果并不满意. Zeldovich 将宇宙学常数解释为真空能. 根据普朗克尺度在量子场论中做出预测, 得到的结果要比观测的结果大 120 个量级. 而中微子的质量尺度, 或出于偶然, 或出于未知的物理原因, 更接近宇宙学常数的

观测值. 因此, 没有明显的理由认为暗能量方程中的 w 为常数($w=-1$), 而是要随着红移变化. 这一理论的挑战, 激励了在新暗能量领域或修改引力模型方面的研究. 在观测上, 精确测量 $w(z)$ 的演变也是一大挑战, 但是由于排除宇宙学常数的最佳方案是测量 w 相对于 -1 的偏差, 这就成为了所有宇宙学问题中必须要面对的问题. 其他观测量, 例如大尺度结构增长因子也已经被提出用来区别暗能量模型.

自从 2005 年, 多探针组合(基于 CAMB 或 CMB-Easy for CMB)对宇宙参数提供更严格的限制, 这是单一探测器所不能比拟的^[2,3]. DETF (2006) 认证 4 个探针来测量 $w(z)$ ^[4]:

- (1) SN-Ia (作为标准烛光);
- (2) BAO (作为标准直尺);
- (3) Clusters ($H(z)$ + growth);
- (4) 弱引力透镜 ($H(z)$ + growth).

从 2005 年到 2007 年见证了修改引力模型的发展和暗能量可能是一种修改引力的想法, 因此除了 $w(z)$ 外, 大尺度结构增长因子 $f(z)$ 也应独立被测量. JDEM

引用格式: 陶嘉琳. 暗能量观测: 现在的状态和未来的发展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1428–1433

Tao Charling. Dark energy observations: Present status and future development (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 1428–1433, doi: 10.1360/132011-966

FoMSWG 工作小组^[5]不鼓励仅使用单一的暗能量状态方程性能指数.

2 现在对于宇宙学参数的限制

迄今为止, 用单一探针(结合 CMB)对于 EoS w 最好的限制仍然是通过 Ia 型超新星得到的^[6,7].

SNLS 团队最近在 3 篇文章中公布了 3 年来观测到的 252 个红移在 0.15~1.1 之间的 Ia 型超新星的分析结果^[6~8], 见图 1. 假设一个平坦的冷暗物质模型, Ia 型超新星自己的数据得到的结果是

$$\Omega_M = 0.211 \pm 0.034 \text{ (stat)} \pm 0.069 \text{ (sys)}.$$

上述结果中系统误差比统计误差大两倍, 见图 2. 主要的系统误差来自于测光定标, 光变曲线拟合的误差为其次, 对 Ω_M 的影响为 ± 0.026 . 数据处理方法、对尘埃的修正和 Ia 型超新星的多样性也对结果造成影响. 在 0.03 的水平上, 没有证据表明颜色-光度关系的斜率 β 随红移发生演化.

未来的巡天将会观测到数以千计的 Ia 型超新星, 但是要提高 $w(z)$ 的精度, 要求绝对定标精度高于现在达到的 3% 的水平. 一个提高绝对定标的标准星的计划, 使之小于 1%, 是很重要的. 至于尘埃修正引起的误差和 Ia 型超新星的多样性, 最佳的途径是通过研究临近的超新星, 许多团队正在提供的数以百计的光变曲线和光谱(CfA, KAIT, SNFactory, ...), 未来对于 Ia 型超新星的红外测量可以减少标准化和尘埃的问题, 从而提高超新星对于 w 的限制.

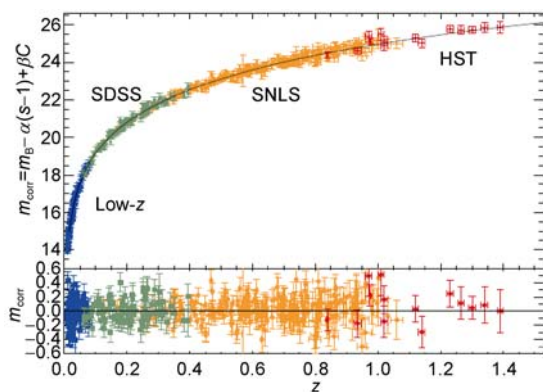


图 1 2011 超新星数据联合分析

472 个高品质的 Ia 型超新星样本: 23 个低红移, 93 个 SDSS 观测样本, 242 个 SNLS 观测样本, 14 个 HST 观测样本

Figure 1 Combined SN 2011 analysis. High quality joint sample of 472 SNIa: 23 low z , 93 SDSS, 242 SNLS, 14 HST.

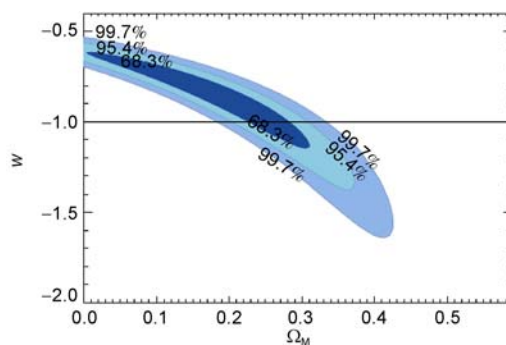


图 2 SNLS 2011 限制

Figure 2 SNLS 2011 constraints.

在图 3 中可以看到, 目前最严格的限制来自于最近的 CMB 结果(WMAP7), 结合 BAO (DR7)数据和最新的 Ia 型超新星(SNLS3)观测数据^[8,9].

和谐模型现在得到很强的支持, 现有的测量给出 $w=-1$, 测量的精度是 5% 左右(统计和系统误差).

3 未来对于宇宙学参数的限制

新的 CMB 观测(Planck)结果将在 2012 年得到. Liu 和 Li^[10]重新分析过 WMAP^[11]的数据并对其四极矩结果提出了挑战, 这对宇宙学参数的确切取值有一定影响. 普朗克四极测量方法可能会对解决这个问题有所帮助. 但是预期宇宙学参数不会发生大的变化(Ω_T , Ω_b , Ω_M , Ω_Λ , h , n_s , τ , σ_8 , w_0 , w_a , bias, ...).

重子声波振荡(BAO)是一个与 Ia 型超新星互补的探针, 很好的限制了 Ω_M , 这已被对 SDSS 和 2dF 测量的星系相关函数或功率谱分析所表明^[12~14]. 今天,

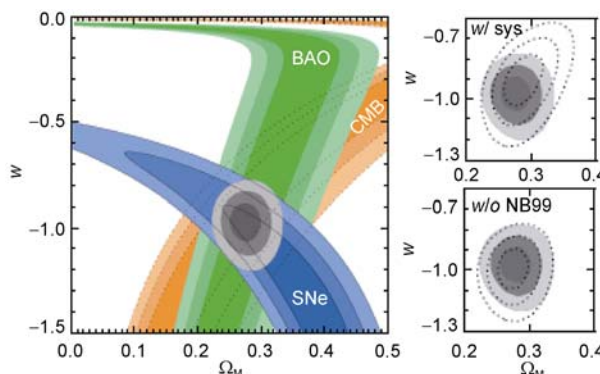


图 3 CMB, BAO, SNe 对于宇宙学参数的联合限制

Figure 3 Combined constraints on cosmological parameters.

只有少量低红移的数据(0.2, 0.35, 0.5)和一个非常远的数据(z_{CMB})可以利用, 还不允许我们对 $w(z)$ 的精度与 Ia 型超新星相当的结果. 但在不久的将来, BOSS, 以及下一代的能够观测上千万个星系的大型深场多目标光谱巡天和其他射电项目^[15]将会使其精度得到提高. 一般认为 BAO 角距离测量受系统误差的影响很小, 因此这个探针最近很受欢迎. 但是还是需要更多数据来进行验证.

最有发展前景的探针是弱引力透镜(WL)宇宙剪切, 如果能够确保测量中的系统问题可以控制在所需要的精度. 至今, 最好的 WL 结果是由 CFHT 团队^[16,17]得到的. 在 CFHT 的数据中有一些 B-模存在, 这显示了系统误差的影响. 通过在映像堆叠之前对每幅图像进行点扩散函数(PSF)修正并使用改进的处理软件, 这些 B-模大部分看来是消失了. 最好的测量将要求全天巡天来统计, 以及对 PSF 的大小和稳定性加以控制, 这可能最好在空间或者南极实现.

然而, Jing 等人^[18]指出, 重子可能对物质的功率谱产生影响. 利用最新的 OWLS AGN 反馈 N 体模拟, Semboloni 等人^[19]强调这对物质的功率谱的影响达到 40%, 进而影响到宇宙学常数的测定.

其他探针也被用来限制 w (强引力透镜效应、星系团计数、SZ 效应……), 如图 4. 最近 Marinoni 和 Buzzi^[1]的研究表明, 星系对的角分布能够提供独

立的限制. 假设两个星系之间间隔矢量是随机取向的, 那么视线夹角有一个正弦分布, 在没有宇宙学效应的影响时平局值为 $2/3$. 视线夹角不是一个可观测的量. 我们所测量的取决于背景度规, 但这是可以计算得到的.

对 SDSS 数据中邻近的($z < 0.05$) 721 个星系对的分析显示了一个接近理论预期的分布. 图 5 中, 红线显示了正弦分布, 蓝线显示了考虑了宇宙学背景度规的结果, 这依赖于宇宙学参数.

$w = -1$ 时最佳拟合值是

$$\Omega_M = 0.25^{+0.11}_{-0.05}, \quad \Omega_\Lambda = 0.65^{+0.22}_{-0.11}.$$

在 68% 的置信水平上, 比当前 Ia 型超新星的估计提高了大约 3 倍的影响. 探测到的宇宙加速膨胀的置信水平大于 99.7%. 对 Λ 的 68% CL 区间与通过 Ia 型超新星和 BAO 联合测量得到的结果在同一水平上. 最终对于 w 的限制接近用 Ia 型超新星得到的结果, 所以利用今后的星系巡天这是很有前途的.

4 DE 状态方程的测量以及它到 0.01 水平的演化

今后的许多巡天都包含若干个探针(WL, BAO,

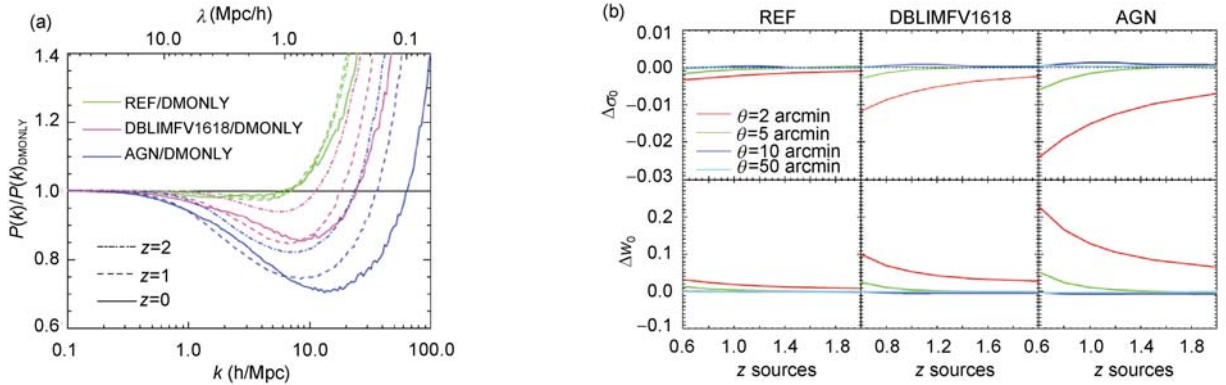


图 4 通过重子模拟和 DMONLY 模拟得到的物质的波动功率谱之间的比例(a)和上(下)图展示了 $\sigma_8(w_0)$ 作为红移的函数对于真实参考值之间的偏离(b) (摘自文献[19])

Figure 4 (a) Ratio between the power spectrum of matter fluctuations measured from the simulations with baryons and the one measured from the DMONLY simulations; (b) top (bottom) panels show the deviation of the inferred $\sigma_8(w_0)$ from the true reference value $\sigma_{8,\text{ref}}=0.74$ ($w_{0,\text{ref}}=-1$) as a function of source redshift (extracted from ref. [19]).

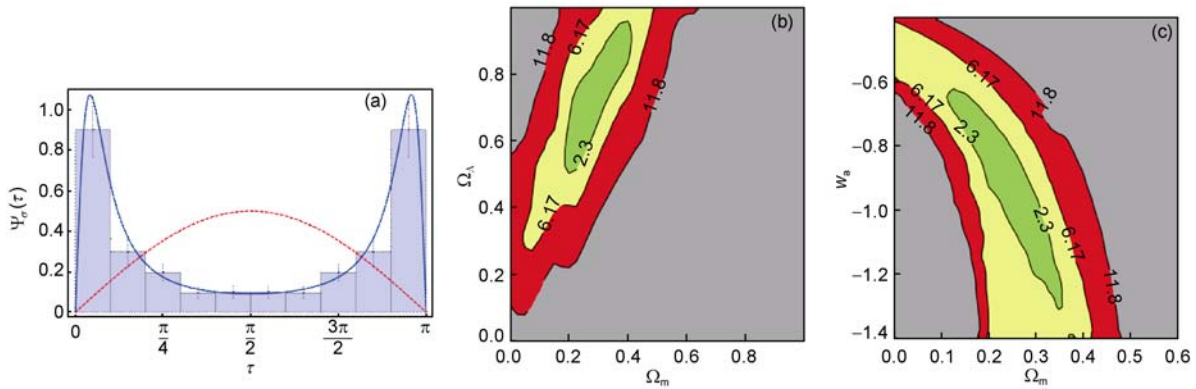


图 5 考虑到宇宙学背景度规的结果(a), 先验假定 $w=-1$ (b)和先验假定平坦宇宙, $w=\text{常数}$ (c)^[1]

Figure 5 (a) The distribution expected with cosmological background metric; (b) prior $w=-1$; (c) prior flat universe, $w=\text{constant}$ [1].

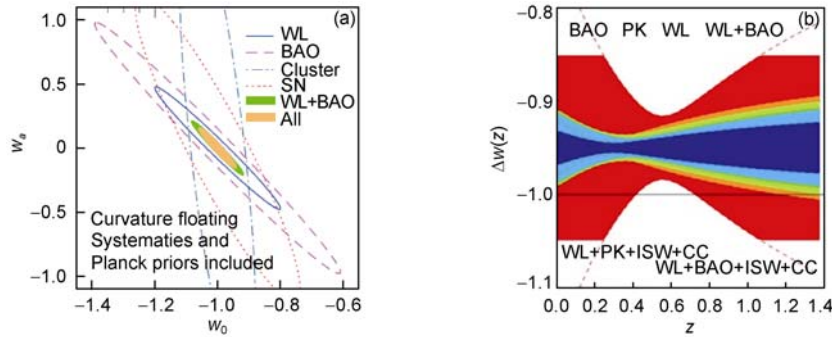


图 6 LSST 科学书对于暗能量的限制(a)和 EUCLID 对于暗能量的限制(b), 这里用到了普朗克先验假定, 误差利用 Fisher 度规 $aw(a)=w_0+(1-a)w_a$ 模型计算, 因此要注意到这些误差是相互关联的

Figure 6 (a) DE constraints from LSST Science Book; (b) EUCLID DE constraints. Planck prior is used. The errors are calculated using Fisher matrices using $aw(a)=w_0+(1-a)w_a$ model, hence the caveat that the errors shown here are correlated.

SN), 如图 6^{1,2)}. BIGBOSS³⁾, SUMIRE⁴⁾, DES⁵⁾或 PAN-STARRS⁶⁾将会对现在的统计结果的精度提高一个量级. 系统的问题也会在被研究, 以便为未来的巡天,

例如 LSST⁷⁾和 SKA⁸⁾, 空间项(EUCLID⁹⁾, WFIRST¹⁰⁾或南极项目(KDUST¹¹⁾, PLT, ...)等做好准备. 宇宙学常数会是最后的答案吗?

1) BOSS, <http://www.sdss3.org/surveys/boss.php>. Dark time observations 2009~2014; 1000-fiber spectrograph; resolution $R \sim 2000$ @360~1000 nm; 10000 deg²; 1.5 million luminous galaxies to $z = 0.7$ Lyman- α forest spectra of 160000 quasars at $2.2 < z < 3$

2) PLANCK, <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=PLANCK>

3) BIGBOSS, arXiv: 0904.0468, arXiv: 1106.1706

4) SUMIRE, <http://sumire.ipmu.jp/en/>

5) DES, <http://www.darkenergysurvey.org/>. 570-Megapixel digital camera, DECam, on the Blanco 4 m telescope at Cerro Tololo Inter-American Observatory. Starting in late 2011 and continuing for five years, DES will survey a large swath of the southern sky

6) PAN-STARRS, <http://pan-starrs.ifa.hawaii.edu/public/home.html>

7) LSST, <http://www.lsst.org/>. Large aperture, wide field survey telescope and 3200 Megapixel camera, trace billions of remote galaxies

8) SKA, <http://www.skatelescope.org/>. World's largest and most sensitive radio telescope

9) EUCLID, <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=102>. A ESA M-class mission with a 1.2 m Korsch Telescope in Visible and near-infrared at the Second Sun-Earth Lagrange point, L2 to measure galaxies and clusters of galaxies out to $z \sim 2$, 16000 deg², plus a deep survey covering an area of 40 deg²

10) WFIRST, <http://wfirst.gsfc.nasa.gov/>. The next US DE space program

11) KDUST, <http://www.kdust.org/KDUST/KDUST.html>. A 2.5 m telescope in Dome A, Antarctica

致谢 感谢这次研讨会的组织者, 特别是詹虎研究员和马捷. 同样很感谢陈学雷研究员提供本文的中文版本.

参考文献

- 1 Marinoni C, Buzzi A. A geometric measure of dark energy with pairs of galaxies. *Nature*, 2010, 468(7323): 539–541
- 2 Yèche C, Ealet A, Réfrégier A, et al. Prospects for dark energy evolution: A frequentist multi-probe approach. *Astron Astrophys*, 2006, 448(3): 831–842
- 3 Xia J Q, Zhao G B, Feng B, et al. Observing dark energy dynamics with supernova, microwave background, and galaxy clustering. *Phys Rev D*, 2006, 73(6): 063521
- 4 Albrecht A, Bernstein G, Cahn R, et al. Report of the dark energy task force. arXiv: astro-ph/0690591
- 5 Albrecht A, Amendola L, Bernstein G, et al. Findings of the joint dark energy mission figure of Merit Science Working Group. arXiv: 0901.0721
- 6 Guy J, Sullivan M, Conley A, et al. The Supernova Legacy Survey 3-year sample: Type Ia supernovae photometric distances and cosmological constraints. *Astron Astrophys*, 2010, 523: A7
- 7 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*, 2011, 192(1): 1
- 8 Sullivan M, Guy J, Conley A, et al. SNLS3: Constraints on dark energy combining the Supernova Legacy Survey three year data with other probes. arXiv:1104.1444
- 9 Li H, Liu J, Xia J Q, et al. Constraining cosmological parameters with observational data including weak lensing effects. *Phys Lett B*, 2009, 675(2): 164–169
- 10 Liu H, Li T P. Systematic distortion in cosmic microwave background maps. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52(5): 804–808; Liu H, Li T P. New evidence for lack of CMB power on large scales. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2010, 53(3): 567–570
- 11 Komatsu E, Smith K M, Dunkley J, et al. Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation, WMAP7. *Astrophys J Suppl*, 2011, 192(2): 18
- 12 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
- 13 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 R Astron Soc*, 2005, 362(2): 505–534
- 14 Reid B A, Percival W J, Eisenstein D J, et al. Cosmological constraints from the clustering of the Sloan Digital Sky Survey DR7 luminous red galaxies. *Mon Not R Astron Soc*, 2010, 404(1): 60–85
- 15 Chen X L. Radio detection of dark energy—the Tianlai project (in Chinese). *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2011, 41: 1358–1366 [陈学雷. 暗能量的射电探测——天籁计划简介. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 1358–1366]
- 16 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(1): 9–25
- 17 Kilbinger M, Benabed K, Guy J, et al. Dark energy constraints and correlations with systematics from CFHTLS weak lensing, SNLS supernovae Ia and WMAP5. *Astron Astrophys*, 2009, 497(3): 677–688
- 18 Jing Y P, Zhang P J, Lin W P, et al. The influence of baryons on the clustering of matter and weak-lensing surveys. *Astrophys J*, 2006, 640(2): L119–L122
- 19 Semboloni E, Hoekstra H, Schaye J, et al. Quantifying the effect of baryon physics on weak lensing tomography. arXiv:1105.1075

Dark energy observations: Present status and future development

TAO Charling^{1,2*}

¹*Tsinghua Center for Astrophysics, Beijing 100084, China;*

²*Center for Particle Physics of Marseilles, Marseilles 13288, France*

In this paper, we review the current situation on dark energy (DE) observation. The latest constraints obtained with SNLS-3year are presented. Other probes are discussed with an emphasis on the new probe using the angular distribution of galaxy pairs.

cosmological parameters, supernova, dark energy equation

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

doi: 10.1360/132011-966