

利用改进了的宇宙模型独立法重建 宇宙膨胀史

李鹏程, 付响云

(湖南科技大学 物理与电子科学学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要:首先利用距离对偶关系重新修正了 Union2.1 超新星数据光曲参数;然后用该光曲参数重新计算了 Ia 型超新星的距离模量;最后用模型独立法重建了宇宙膨胀史和暗能量的演化性质.在 1σ 置信度,重建的宇宙的膨胀史及暗能量性质与真空暗能量模型并不一致,这一结果更支持一个随红移演化的暗能量宇宙模型.

关键词:暗能量;宇宙参数;超新星

中图分类号:O412.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2017)03-0121-06

Reconstructing the cosmic expansion history with a improved cosmological model-independent method

Li Pengcheng, Fu Xiangyun

(School of Physics and Electronics, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: With the help of the distance-duality relation (DDR), the light-curve fitting parameters, which in the distance estimation from the original Union2.1 SNe Ia compilation, were calibrated, the distance modulus for the SNe Ia with the corrected fitting parameters were re-estimated, and using the cosmological-model-independent reconstruction, for the cosmic expansion history and the evolving property of dark energy were reconstructed. The result shows that the reconstructed results are inconsistent with the Λ CDM model at 1σ confidence level (CL), and it seem to support an evolutionary dark energy with redshift evolution.

Keywords: dark energy; cosmological parameters; supernova

1 当前研究现状

很多独立的天文观测很好地证实宇宙加速膨胀这一现象,比如 Ia 型超新星,宇宙微波背景辐射温度的各向异性以及星系能谱中的重子声学振荡^[1]等等.为了解释这个现象,人们提出宇宙应该存在一种奇异的具有负压的能量,并命之为暗能量^[2].虽然暗能量是当今科学界广泛研究的热点课题,但人们对暗能量的基本性质并不清楚^[3].在研究暗能量性质的方法中,宇宙模型独立法是有效且可靠的方法之一.至今为止,很多研究者用 Ia 型超新星数据集,通过模型独立法重建了宇宙膨胀史和暗能量的演化性质^[4].模型独立的法主要可以分为参数化与非参数化两种方法.第一种方法是用任意的常数对暗能量的某些变量进行参数化,比如状态方程 $w(z)$,哈勃参数 $H(z)$,光度距离 $D_L(z)$,然后用观测数据确定这些常数,就能得到暗能量的演化性质了^[4].第二种方法是非参数化,处理天文观测数据的噪音直接得到一些宇宙学参数的

收稿日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11147011);湖南省教育厅基金资助项目(G21609;G31556)

通信作者:付响云(1973-),男,湖南岳阳人,博士,副教授,主要从事量子理论与宇宙学等物理方面的研究. E-mail:xiangyunfu@qq.com

信息^[5].

最近,Shafieloo 等人使用高斯抹平函数在红移空间抹平了 Ia 型超新星数据,然后用非参数化的模型独立法得到了宇宙膨胀史和暗能量演化性质^[4].后来,通过推广这一方法,文献[6]得到了暗能量的演化性质.此外,文献[7]用这种方法研究了空间弯曲对重构宇宙膨胀史和暗能量演化性质的影响.

然而,可以看出这些文献所使用的 Ia 型超新星数据集的距离模量却是依赖某种宇宙模型的.以 SALT2 超新星数据的光曲参量为例,通过加入光形与光色参数得到距离模量 $\mu = 5\log d_L + 25$ 可以表述成式(1):

$$\mu_B(\alpha, \beta, M_B) = m_B^{\max} + \alpha x - \beta c - M_B. \quad (1)$$

式中: m_B^{\max} 为静止框架下 B 波段的峰值; x 为描绘 Ia 型超新星光曲形状的拉伸因子; c 为 Ia 型超新星的颜色参数.这 3 个参数可以通过拟合 Ia 型超新星的光曲得到,因此,它们独立于宇宙模型.另外 3 个变量 M_B , α, β 相对难以确定,它们一般是通过拟合某种宇宙模型哈勃图中物理量残差的最小值得到.这意味着我们通过这种方法得到的距离模量在一定程度上依赖这种宇宙模型,那么用这样的距离模量重建的宇宙膨胀史和暗能量的性质也是依赖宇宙模型的.因此,这种方法可以加以改进.

实际上,距离对偶关系(DDR)^[8]

$$\frac{D_L}{D_A}(1+z)^2 = 1. \quad (2)$$

为我们提供了用宇宙模型独立的方式来限制光曲拟合参数 M_B, α, β 的可能.由于该关系在黎曼几何的宇宙模型中都是成立的,它只要求光子沿测地线运动和光子数守恒.如果我们得到相同红移的 D_A 和 D_L , 就可以对光曲的参数进行拟合了,文献[9]就用这种方法修正了 Union2 和 SNLS3 Ia 型超新星的距离模量.本文中,我们首先利用 DDR 修正 Union2.1 数据光曲拟合参数 M_B, α, β , 然后重新计算距离模量,再用模型独法重建宇宙膨胀史和暗能量的演化性质.

2 限制光曲拟合参数

DDR 提供了一个很好的途径使得我们能够用模型独立的方法限制光曲拟合参数.原则上,给定一个 D_L , 我们必须找到相同红移的 D_A , 不过对于我们选取提供 D_L 和 D_A 的数据源 Ia 型超星数据和星系团数据,这个条件一般不能满足.由于超新星数据远多于星系团数据,Holanda 等人采取临近法来找到 D_L 和 D_A 数据对,该方法是在满足红移差 $\Delta z = |z_{\text{clu}} - z_{\text{SNe}}| < 0.005$ 的条件下,选择与星系团数据红移最接近超新星数据,然后把两者作为一对数据组,其中 z_{clu} 与 z_{SNe} 分别为星系团数据与 Ia 型超新星数据的红移.一般满足选择条件的数据有多个,而选择满足条件的数据中一个将给计算结果带来偶然误差.为了避免这一缺点,我们使用并方法,即对所有满足条件的 Ia 型超新星数据加权平均,从而得到对应的距离模量数据以及误差数据公式(3)和(4).

$$\mu^{\text{SNe}} = (\sum_i \mu_i^{\text{SNe}} / \sigma_{\mu i}^2) / (\sum_i \sigma_{\mu i}^{-2}). \quad (3)$$

$$\sigma_{\mu}^{\text{SNe}} = (\sum_i \sigma_{\mu i}^{-2})^{-1/2}. \quad (4)$$

式中:Ia 型超新星的误差可以表示为式(5):

$$\sigma_{\mu}^2 = \sigma_m^2 + \sigma_{\alpha}^2 x^2 + \alpha^2 \sigma_x^2 + \sigma_{\beta}^2 c^2 + \beta^2 \sigma_c^2. \quad (5)$$

应该指出的是这样得到的距离模量 μ^{SNe} 以及相应的 $\sigma_{\mu}^{\text{SNe}}$ 是 α 和 β 的函数.另外,从星系团数据中得到的距离模量可以表示为式(6):

$$\mu^{\text{Clu}} = 5\log\left[\frac{D_A^{\text{Clu}}(1+z)^2}{\text{Mpc}}\right] + 25. \quad (6)$$

然后我们就可以通过式(7)中 χ^2 的计算来拟合光曲的拟合参数 α 和 β .

$$\chi^2(\alpha, \beta, M) = A - 2MB + M^2 C. \quad (7)$$

式中,

$$A(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{25} \frac{[\mu^{\text{SNe}}(z_i; \alpha, \beta, M=0) - \mu^{\text{Clu}}(z_i)]^2}{\sigma_{\text{tot}}^2(\alpha, \beta)}; \quad (8)$$

$$B(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{25} \frac{[\mu^{\text{SNe}}(z_i; \alpha, \beta, M=0) - \mu^{\text{Clu}}(z_i)]}{\sigma_{\text{tot}}^2(\alpha, \beta)}; \quad (9)$$

$$C(\alpha, \beta) = \sum_{i=1}^{25} \frac{1}{\sigma_{\text{tot}}^2(\alpha, \beta)}. \quad (10)$$

式中: σ_{tot} 为从 Ia 型超新星和星系团数据传递过来的统计误差. 式(6)在 $M = B/C$ 时得到最小值, 变为式(11):

$$\tilde{\chi}^2(\alpha, \beta) = A(\alpha, \beta) - \frac{B^2(\alpha, \beta)}{C(\alpha, \beta)}. \quad (11)$$

3 误差敏感抹平法

近来, 文献[10]提出了误差敏感抹平法来重建宇宙膨胀史, 该方法主要由以下的迭代方程式(12)构成

$$\ln f(z)_n^s = \ln f(z)_{n-1}^s + N(z) \sum_i \frac{[\ln f^{\text{obs}}(z_i) - \ln f(z)_{n-1}^s]}{\sigma_{f^{\text{obs}}(z_i)}^2} \exp\left[-\frac{\ln^2\left(\frac{1+z}{1+z_i}\right)}{2\Delta^2}\right]. \quad (12)$$

式中: $\ln f(z) \equiv \ln D_L(z) - \ln h$; $D_L(z)$ 为 Ia 型超新星的照度距离; $h = H_0/100$; $N(z)$ 为归一化参数, 定义如式(13)

$$N(z)^{-1} = \sum_i \exp\left[-\frac{\ln^2\left(\frac{1+z}{1+z_i}\right)}{2\Delta^2}\right] \frac{1}{\sigma_{f^{\text{obs}}(z_i)}^2}. \quad (13)$$

式中: Δ 为抹平尺度因子, 需要先验取定, 这里我们取 $\Delta = 0.30$. 当 $n = 1$ 时, 得式(14)

$$\begin{aligned} \ln f(z)_1^s &= \ln f(z)_0^s + N(z) \sum_i \frac{[\ln f^{\text{obs}}(z_i) - \ln f(z)_0^s]}{\sigma_{f^{\text{obs}}(z_i)}^2} \exp\left[-\frac{\ln^2\left(\frac{1+z}{1+z_i}\right)}{2\Delta^2}\right] = \\ \ln D_L(z)_0^s &+ N(z) \sum_i \frac{[\ln f^{\text{obs}}(z_i) - \ln D_L(z)_0^s]}{\sigma_{f^{\text{obs}}(z_i)}^2} \exp\left[-\frac{\ln^2\left(\frac{1+z}{1+z_i}\right)}{2\Delta^2}\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $D_L(z)_0^s$ 是 $w = -0.9$; $\Omega_{m0} = 0.28$ 的 w 真空暗能量模型给出的结果. 每次迭代, 我们都会计算卡方的值, 见式(15)

$$\chi_{s,n}^2 = \sum_i \frac{(\mu(z_i)_n - \mu^{\text{obs}}(z_i))^2}{\sigma_{\mu_{\text{obs},i}}^2}. \quad (15)$$

当卡方达到最小值时, 就认为得到了最好的拟合结果, 这样就得到了任一红移对应照度距离的函数. 68.3%的置信区间对应于 $\Delta\chi_s = 1$. 当 $n = 42$ 时, 卡方达到最小值, 迭代结果如图 1 所示

将迭代得到照度距离函数对红移进行求导, 我们能够得到哈勃参量 $H(z)$, 见式(16)

$$H(z) = 100 \left[\frac{d}{dz} \left(\frac{f(z)}{1+z} \right) \right]^{-1}. \quad (16)$$

也能对 H_0 进行限制. 另外, 加速因子 $q(z)$ 和暗能量的物态方程 $w(z)$ 可以表示为式(17)和(18)

$$q(z) = (1+z) \frac{H'(z)}{H(z)} - 1; \quad (17)$$

$$w(z) = \frac{[2(1+z)/3]H'/H - 1}{1 - (H_0/H)^2 \Omega_{m0}(1+z)^3} \quad (18)$$

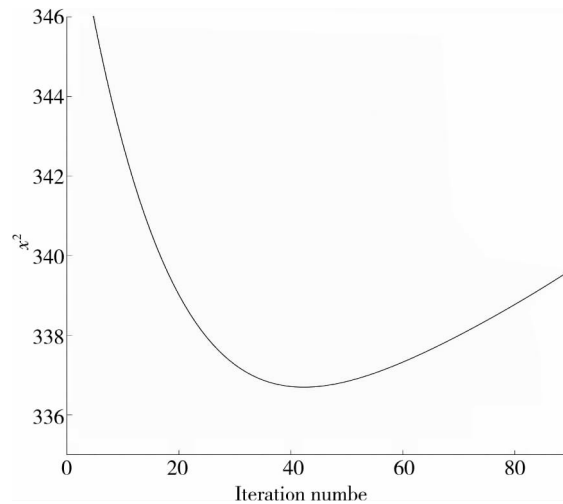


图1 每次迭代计算得到的卡方 χ_s^2 的值

4 结果与分析

在置信度内,我们得到光曲的拟合参数 $\alpha = 0.373 \pm_{0.618}^{0.395}$, $\beta = 3.763 \pm_{2.383}^{3.331}$, 如图2所示

用修正了的参数重新计算 Union2.1 Ia 型超新星的绝对星等为 -19.50 , 与光度测量^[11]的结果 $M = -19.36 \pm 0.18$ 非常一致. 这些结果也许就说明了我们的方法对光曲参数的修正是可靠的. 图3给出的是修正后的 Union2.1 给出的距离模量, 其误差棒比文献给出的要大, 因为星系团的数据较少, 我们得到的 α 和 β 的误差要更大些.

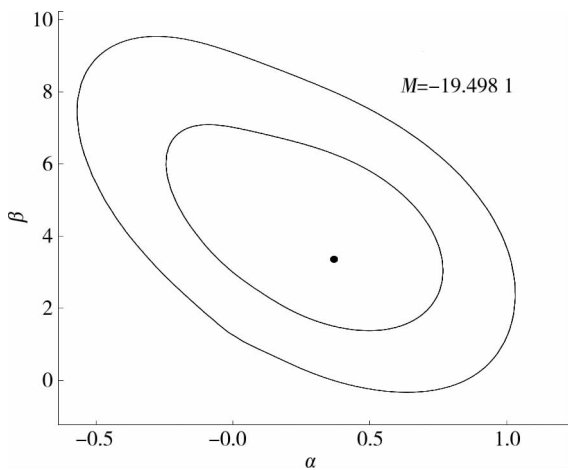


图2 Union2.1 超新星光曲参数的限制结果

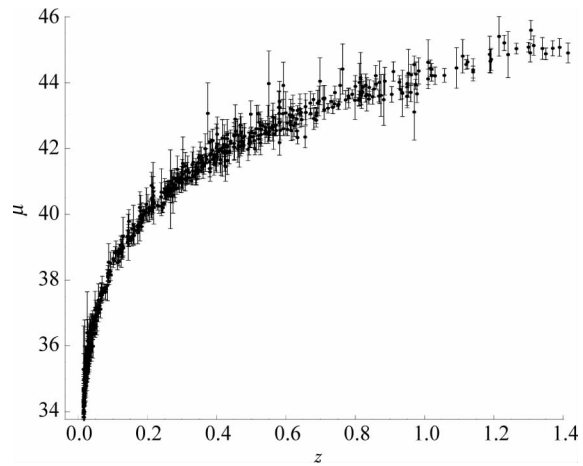


图3 从原始的 Union2.1 数据修正的距离模量以及误差

使用修正了的距离模量和误差我们重建了哈勃参量 $H(z)$ 和加速因子 $q(z)$ 如图4所示. 图中虚线代表了最佳的重建结果, 点划线代表现今暗物质物质密度参量 $\Omega_{m0} = 0.282$, 哈勃参量 $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 的真空暗能量宇宙模型给出的结果.

由图4b可以我们得出现今的宇宙正在加速膨胀, 宇宙从减速膨胀转变到加速膨胀的红移相变红移为 $0.71 < z_t < 0.85$. 这一结果与文献[5]的结果一致. 另外, 由重建了的哈勃参数, 我们得到了暗能量的状态方程 $w(z)$ 的演化曲线.

从图4可以看出, 我们的结果与 Λ CDM 真空暗能量模型所给出的哈勃参数、减速因子及暗能量的物态方程在 68.3% 的置信区间内并不一致, 这也说明 Union2.1 Ia 型超新星更倾向于一个演化的暗能量模型.

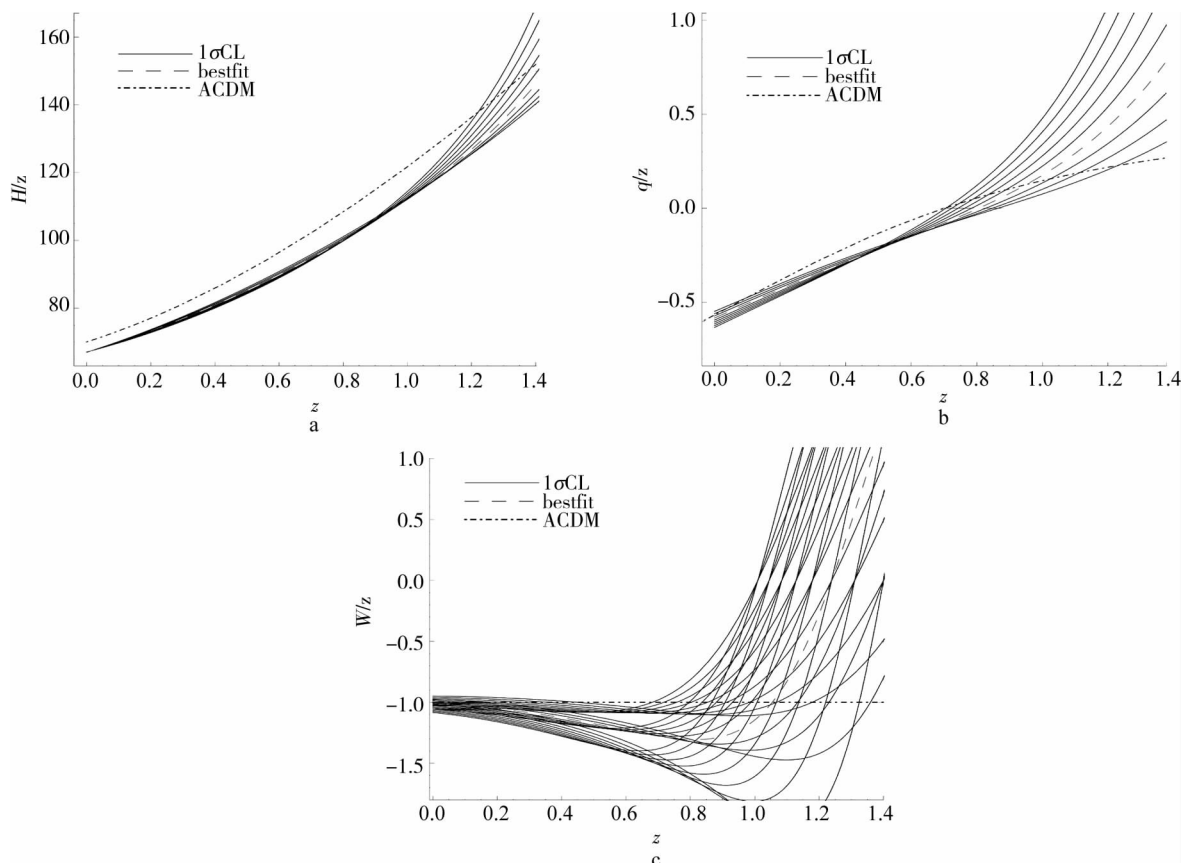


图4 重建的哈勃参量、加速因子与暗能量的状态方程的演化

5 结论

很多文献用所谓的宇宙模型独立法重建了宇宙膨胀史和暗能量演化性质.但是,这些方法也许并非是完全宇宙模型独立,因为这些文献直接运用了 Ia 型超新星的距离模量数据,而距离模量的获得是依赖某种宇宙模型的,故这些方法并非完全宇宙模型独立.天文观测上的距离对偶关系给出相同红移的角直径距离 D_A 和照度距离满足 D_L 一定的关系.如果角直径距离测量准确的话,根据这一关系就可以重新修正 Union2.1 Ia 型超新星数据光曲拟合参数 α, β , 因此在不需要任何宇宙模型的假设下,可以利用距离对偶关系重新确定超新星的照度距离.本文为了克服文献中不能完全独立于宇宙模型的缺陷,首先利用距离对偶关系修正了超新星数据的照度距离;然后用修正的光曲拟合参数 α, β 重新计算 Union2.1 Ia 型超新星距离模量;接着用修正的距离模量数据,通过模型独立的方法,重建了宇宙的膨胀史以及暗能量的演化性质.计算结果给出重构宇宙膨胀史与暗能量态方程参量跟真空暗能量模型在 1σ 置信度不相符, Union2.1 超新星数据更偏向一个不断演化的暗能量;同时减速因子给出现今的宇宙正在加速膨胀,宇宙从减速膨胀转变到加速膨胀相变红移区间为 $0.71 \sim 0.85$.

由于现今天文观测上的角直径距离不够多,观测的精确度也不够精确,本文重建的超新星距离模量的误差棒比较大,但是重新计算 Union2.1 Ia 型超新星的绝对星等为 -19.50 , 与光度测量^[11]的结果 $M = -19.36 \pm 0.18$ 非常一致,这说明我们的方法非常可靠,期待天文观测上提供更多更精确的数据来重建宇宙的膨胀史以及暗能量性质.

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[J]. Astronomical Journal, 1998, 116(3):1009-1038.

- [2] Padmanabhan T. Dark Energy: Mystery of the Millennium[J]. Aip Conf Proc, 2006, 861(1):0603114–118.
- [3] Peebles P J E. The Cosmological Constant and Dark Energy[J]. Review of Modern Physics, 2002, 75(2):559–606.
- [4] Shafieloo A, Alam U, Sahni V, et al. Smoothing supernova data to reconstruct the expansion history of the Universe and its age [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 366(3): 1081–1095.
- [5] Shafieloo A. Model-independent reconstruction of the expansion history of the Universe and the properties of dark energy[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 380(4): 1573–1580.
- [6] Wu P, Yu H. Probing the cosmic acceleration history and the properties of dark energy from the ESSENCE supernova data with a model independent method[J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2008(2): 019–029.
- [7] Fu X, Wu P, Yu H, et al. The Effect of Curvature in Determining the Property of Dark Energy from Type Ia Supernova with a Model Independent Method[J]. International Journal of Modern Physics D, 2013, 22(6): 1350025–1350029.
- [8] Gathering I M H. On the definition of distance in general relativity[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1933, 15(100): 761–773.
- [9] Yang X, Yu H R, Zhang Z S, et al. An improved method to test the Distance--Duality relation[J]. Astrophysical Journal, 2013, 777(2):1845–1858.
- [10] Shafieloo A, Clarkson C. Model independent tests of the standard cosmological model[J]. Physical Review D Particles & Fields, 2009, 81(8):1058–1066.