

$H(z)$ 数据对相互作用暗能量模型的观测研究*

潘宇^{1,2} 李力¹ 曹硕³ 潘娜娜^{1,2}† 张益^{1,2} 胡紫萱¹

(1 重庆邮电大学理学院 重庆 400065)

(2 中国科学院理论物理研究所理论物理国家重点实验室 北京 100190)

(3 北京师范大学天文系 北京 100875)

摘要 结合最新的哈勃参量 $H(z)$ 观测数据、重子声学振荡(BAO)数据与普朗克卫星观测得到的宇宙微波背景辐射(CMB)数据,利用马尔柯夫链蒙特卡洛算法(MCMC)对一种相互作用暗能量模型进行了观测限制. 这3种数据联合限制得到的各参数的最佳拟合值及 1σ 误差范围分别为: 物质能量密度参数 $\Omega_m = 0.266^{+0.028}_{-0.028}$, 相互作用因子 $\gamma = 0.090^{+0.100}_{-0.098}$, 暗能量状态方程参数 $w_X = -1.307^{+0.263}_{-0.269}$, 哈勃常数 $H_0 = 74.20^{+4.66}_{-4.56}$. 相互作用耦合参数 $\gamma > 0$ 表明能量正在从暗物质转移到暗能量. 然而,宇宙学常数模型中的巧合性问题的 1σ 误差范围内依然可以轻微缓解. 为了更好地做出比较,还利用BAO+CMB组合数据及单独的 $H(z)$ 数据对该模型进行了考察,得到的结果如下: (1) $H(z)$ 数据能对相互作用参数 γ 给出更好的限制结果; (2) Λ CDM模型仍然是与观测数据符合得最好的模型,耦合参数 γ 与其它模型参数(Ω_m , H_0)相互关联; (3)在考虑了暗能量与暗物质间的相互作用之后,超新星局域距离阶梯测量与普朗克观测对 H_0 限制结果的冲突问题能够得到一定程度的缓解.

关键词 宇宙学: 暗能量, 宇宙学: 宇宙学参数, 宇宙学: 观测

中图分类号: P159; **文献标识码**: A

1 引言

近年来,各种天文观测结果已经证实我们所处的宇宙正处于一个加速膨胀的时期^[1-13]. 为了解释这种不可思议的现象,人们考虑宇宙中可能存在着一种具有负压强的暗能量,它均匀地分布在宇宙空间并且主导着宇宙的加速膨胀. 最简单的暗能量模型是基于广义相对论而提出的 Λ CDM模型,该模型能够很好地解释各种观测数据,但却存在着颇受争议的巧合性问题: 由理论可知,宇宙中的物质密度随着宇宙膨胀

2015-03-11收到原稿, 2015-03-23收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11005164, 11447213)、重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJ130535)、重庆邮电大学科学研究基金(A2013-25, A2014-43)、中央高校基本科研业务费专项资金以及中国博士后科学基金面上资助项目(2014M550642)资助

†pannn@cqupt.edu.cn

以 a^{-3} 衰减(a 为标度因子, $a = (1+z)^{-1}$, 其中 z 代表红移), 而作为暗能量的宇宙学常数 Λ 的密度不会发生改变, 但是为什么现在我们所处时期的暗能量与物质的密度具有相同的量级? 为了有效地解释和缓解这个问题, 各种暗能量动力学模型相继被提出, 包括精质模型(Quintessence)^[14–15]、幽灵暗能量模型(Phantom暗能量)^[16–17]、k-essence模型^[18–19]、精灵模型(Quintom暗能量)^[20–22]等. 此外, 更为有效的一种方法是考虑暗能量和暗物质之间可能存在相互作用, 本文将聚焦一种重要的相互作用暗能量模型. 该模型采用一种简单的唯象方法来描述宇宙中暗能量与物质组分的演化, 即暗能量与物质密度之比正比于尺度因子的幂指数形式. 此外, 对于研究宇宙目前的加速膨胀过程, 借助天文观测数据对暗能量模型进行观测检验是一种非常重要的手段. 众所周知, 诸如伽玛暴(GRBs)^[23–24]、Ia型超新星(SNe Ia)、重子声学振荡(BAO)、宇宙微波背景辐射(CMB)等观测数据使用的都是对距离来进行测量. 比如, 限制暗能量模型参数最常用的方法是将这些参数与光度距离拟合:

$$d_L(z) = (1+z) \int_0^z \frac{dz}{H(z)}, \quad (1)$$

其中, 被积分的哈勃参数为 $H \equiv \dot{a}/a$, 点表示对宇宙时间 t 的微分. 但是, 通过积分哈勃参数 $H(z)$ 获得距离标度却完全忽略了哈勃参量自身的精细结构, 诸多重要信息也在积分过程中被遗失. 在这种背景下, 直接利用哈勃观测数据限制暗能量模型参数具有更加明显的优势, 这种方法已经在很多文献工作中被广泛应用^[25–30]. 本文将采用最新观测得到的31组 $H(z)$ 数据, 借助马尔柯夫链蒙特卡罗算法(MCMC)对相互作用暗能量模型进行观测检验, 以期对暗能量与暗物质之间的相互作用进行有效的探究. 同时, 为了减小观测数据的不确定因素及限制误差, 我们同时结合了普朗克卫星所得的微波背景辐射数据^[31–32]和重子声学振荡观测数据^[33–34].

本文主要由以下几部分组成: 在第2部分中我们将主要介绍暗能量与暗物质相互作用模型的理论框架, 第3部分则主要介绍各种天文观测数据, 第4部分将对暗能量模型的限制结果进行分析与讨论, 最后对本文得到的结论进行简要总结.

2 相互作用暗能量模型

为了缓和巧合性问题, 一个很好的方法就是考虑暗能量和暗物质之间可能的相互作用. 我们通常假定它们之间仅通过引力耦合来进行能量交换. 例如, 暗能量可能会受到诸如黑洞等天体的引力作用而被大质量致密天体吸积. 而在宇宙学背景下, 微弱但不能被忽略的能量会在暗能量与暗物质之间进行转移. 人们已经发现恰当的相互作用会影响摄动动力学和CMB角功率谱的最低阶多极矩^[35–37]. 因此, 我们可以通过宇宙的膨胀历史来推断出暗能量与暗物质之间的相互作用.

在平坦的FRW度规描述的宇宙中, 暗物质和暗能量并非独立演化, 两者可以通过相互作用项 Q 进行能量交换:

$$\dot{\rho}_X + 3H(\rho_X + p_X) = -Q, \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = Q, \quad (3)$$

此时能量守恒方程 $\dot{\rho}_{\text{tot}} + 3H(\rho_{\text{tot}} + p_{\text{tot}}) = 0$ 依然适用, 其中 $\rho_{\text{tot}} = \rho_X + \rho_m$. 由于暗能量与暗物质的未知性, 我们很难从第一性的原理出发计算出两者之间相互作用的形式. 通过唯象描述的方法, 之前诸多文献在 Q 的参数化形式方面做出了很多工作^[38–50]. 在本文中, 我们将引入一个新的参数来刻画相互作用项, 即假设暗能量和物质密度之比正比于标度因子的幂指数形式: $\frac{\rho_X}{\rho_m} = \frac{\rho_{X0}}{\rho_{m0}} a^\xi$ ^[51], 其中 ξ 是量化巧合性问题严重程度的常数参数^[52]. 此时相互作用项 Q 的表达式为^[26,47,51]:

$$Q = \frac{-(1 - \Omega_m)(\xi + 3w_X)}{1 - \Omega_m + \Omega_m(1 + z)^\xi} H \rho_m, \quad (4)$$

其中 Ω_m 是当前宇宙中的物质密度参数, $\gamma = \xi + 3w_X$ 为相互作用因子. $\gamma = 0$ 代表暗能量与暗物质间不存在相互作用的标准宇宙学模型, 而 $\gamma \neq 0$ 则表示存在能量交换的非标准宇宙学模型. 此外, 当 $\gamma > 0$ 时, 能量的转移方向是从暗物质到暗能量 ($Q < 0$), 巧合性问题依然非常严重, 而 $\gamma < 0$ 恰恰相反 ($Q > 0$). 此外, 本文中假设暗能量的状态方程 $w_X \equiv p_X/\rho_X$ 在平直的 FRW 度规中为一个常数参数, 此时的弗雷德曼方程可表示为

$$E^2(z) = (1 + z)^3 [\Omega_m + (1 - \Omega_m)(1 + z)^{-\xi}]^{-3w_X/\xi}. \quad (5)$$

3 哈勃参量 $H(z)$ 以及其他观测数据

与其他各种距离测量数据不同, 哈勃参数取决于宇宙年龄相对于红移的变化率^[53]

$$H(z) = -\frac{1}{1 + z} \frac{dz}{dt}. \quad (6)$$

因此, 如果可以对 dz/dt 进行精确测量, 就可以直接得到红移 z 处的哈勃参量 $H(z)$ 值. 目前 $H(z)$ 数据可以通过两种观测方法得到, 一种是测量不同红移处的 Red-envelope 星系的年龄, 另外一种则是从重子声学振荡峰值的观测中分析提取 $H(z)$. 这就是大家熟知的“年龄差分法(Differential Age Method)”和“峰值法(Peak Method)”. 本文将使用结合以上两种测量方法得到的最新 31 组 $H(z)$ 数据. 其中, 11 组不同红移的数据来自文献[54], 2 组来源于文献[55], 8 组出自于文献[56], 3 组来源于文献[57], 4 组源于文献[58], 剩余 3 组出自于文献[59–61]. 我们将采用 χ^2 检验的方法对各个宇宙学参数进行检验和限制, 哈勃参量数据对应的 χ^2 值如下

$$\chi_H^2 = \sum_{i=1}^{31} \frac{[H(z_i) - H_{\text{obs}}(z_i)]^2}{\sigma(z_i)^2}, \quad (7)$$

其中 $H(z_i)$ 、 $H_{\text{obs}}(z_i)$ 和 $\sigma(z_i)$ 分别代表 $H(z)$ 的理论值、观测值和相应的 1σ 误差.

对于重子声学振荡观测数据, 我们首先考虑由亮红星系(Luminous Red Galaxies)巡天 7 yr 数据(Data Release 7)发布的测光样本得到的 BAO 角标度: $\theta_{\text{BAO}}(z = 0.55) = (3.90 \pm 0.38)^\circ$ ^[62–64]. 该数据是对单纯的角重子声学振荡信号的首次直接测量. θ_{BAO} 定义为^[65]

$$\theta_{\text{BAO}} = \frac{r_s(z)}{D_r(z)}, \quad (8)$$

其中依赖模型的共动径向距离 $D_r(z)$ 表示为:

$$D_r(z) = \frac{1}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{E(z)}, \quad (9)$$

声速视界 $r_s(z)$ 为:

$$r_s(z) = \int_z^\infty \frac{c_s(z)dz}{E(z)}, \quad (10)$$

其中声速 $c_s(z) = 1/\sqrt{3[1 + \bar{R}_b/(1+z)]}$, 而 $\bar{R}_b = 3\Omega_b h^2/(4 \times 2.469 \times 10^{-5})$. 其次, 我们采用了由WiggleZ暗能量巡天项目在3个不同红移处 $z = 0.44$ 、 $z = 0.6$ 和 $z = 0.73$ 观测得到的重子声学振荡参数 $A^{[30,34]}$, 斯隆数字巡天(SDSS)7 yr数据中从星系样本中提取的 $z = 0.2$ 和 $z = 0.35$ 处BAO距离比 $d_z^{[5,33,66]}$, 6dFGS巡天在 $z = 0.106$ 处得到的 $d_{0.106} = 0.336 \pm 0.015^{[34]}$ 距离比数据.

对于宇宙微波背景辐射观测, 采用普朗克卫星最新得到的包括声学尺度 l_a 、偏移参数 R 及 $\Omega_b h^2$ 在内的数据^[31-32]. 此时 $H(z)$ +BAO+CMB联合数据给出的 χ^2 值可表示为:

$$\chi^2 = \chi_H^2 + \chi_{\text{BAO}}^2 + \chi_{\text{CMB}}^2. \quad (11)$$

4 模型参数拟合结果

利用上述最新的观测结果, 将采用基于马尔柯夫链蒙特卡罗(MCMC)算法的最大似然法^[67]拟合相应的 χ^2 值. $H(z)$ +BAO+CMB联合数据给出的模型最佳拟合值及 1σ 的误差为: $\Omega_m = 0.266^{+0.028}_{-0.028}(1\sigma)$ 、 $w_X = -1.307^{+0.263}_{-0.269}(1\sigma)$ 、 $\gamma = 0.090^{+0.100}_{-0.098}(1\sigma)$ 以及 $H_0 = 74.20^{+4.66}_{-4.56}(1\sigma)$. 值得注意的是, 相互作用因子 γ 的最佳拟合值非常小, 这表明暗能量与物质间的相互作用强度非常弱; 其次, $\gamma > 0$ 表明能量正从暗物质向暗能量转化.

作为对比, 我们分别用 $H(z)$ 和BAO+CMB两种数据组合限制了相互作用模型参数, 得到的结果见图1-3和表1. 拟合结果显示: 虽然单独的 $H(z)$ 数据不能很好地限制模型参数, 但是 $H(z)$ +BAO+CMB所得结果比BAO+CMB限制得更好. 这表明, $H(z)$ 数据能够更好地限制模型参数以及减小 γ . 并且, 通过对比之前 $H(z)$ 样本与 $H(z)$ +BAO+CMB数据限制结果^[26], 本文得到的限制结果误差更小. 由图1-3可知, 模型参数 γ 、 Ω_m 、 H_0 三者间存在相互关联的可能性. 此外, 由表1可知, 单独使用哈勃参量 $H(z)$ 数据得到的相互作用因子 $\gamma < 0$, 这与其它两种数据组合下的结论相反. 同时, $\gamma = 0$ 在 1σ 置信区间内依然与观测数据相符, 这之前人们所得的结论符合得很好^[26,47,68]. 在图4中, 我们还比较了31组哈勃参量的测量值与相互作用暗能量模型中哈勃参数随红移演化的理论曲线, 结果表明: 模型框架下的 $H(z)$ 随红移 z 的演化与观测结果符合得很好.

众所周知, 基于 Λ CDM模型, 普朗克卫星和超新星观测数据给出的哈勃常数 H_0 值存在明显的不一致. 普朗克卫星给出的 $H_0 = (67.3 \pm 1.2) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, 而超新星局域距离阶梯测量给出的 $H_0 = (73.8 \pm 2.4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ^[69-70]. 通过比较本文 $H(z)$ 和BAO+CMB得到的结果, 我们发现在 1σ 范围内两种数据给出的 H_0 拟合结果精度相同且符合度很高. 并且考虑相互作用项后所得的 H_0 与普朗克及超新星给出的结果都符合很好, 这表明: 引入了相互作用项后的暗能量模型可以较好地缓解这两种数据给出的哈勃常数拟合结果的不一致性.

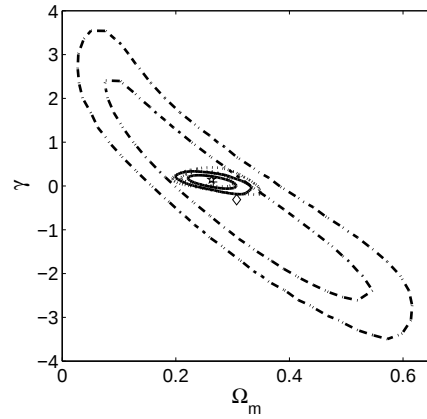


图 1 由 $H(z)$ (点划线)、BAO+CMB (点线) 和 $H(z)$ +BAO+CMB (实线) 数据组合得到的 Ω_m 与 γ 参数 1σ 和 2σ 误差等高线图, 其中菱形、星形与十字分别对应于 $H(z)$ 、BAO+CMB 和 $H(z)$ +BAO+CMB 数据组合下的最佳拟合值

Fig. 1 The marginalized 1σ and 2σ confidence contours of the parameters Ω_m and γ in the phenomenological interacting scenario, obtained from the combinations of all observational data $H(z)$ (dash-dotted line), BAO+CMB (dotted line), and $H(z)$ +BAO+CMB (solid line), where the diamond, star, and cross are the best-fit values for the observational data $H(z)$, BAO+CMB, and $H(z)$ +BAO+CMB, respectively

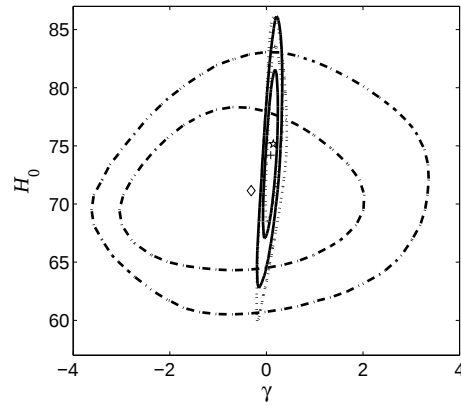


图 2 由 $H(z)$ (点划线)、BAO+CMB (点线) 和 $H(z)$ +BAO+CMB (实线) 数据组合得到的 γ 与 H_0 参数 1σ 和 2σ 误差等高线图, 其中菱形、星形与十字分别对应于 $H(z)$ 、BAO+CMB 和 $H(z)$ +BAO+CMB 数据组合下的最佳拟合值

Fig. 2 The marginalized 1σ and 2σ confidence contours of the parameters γ and H_0 in the phenomenological interacting scenario, obtained from the combinations of all observational data $H(z)$ (dash-dotted line), BAO+CMB (dotted line), and $H(z)$ +BAO+CMB (solid line), where the diamond, star, and cross are the best-fit values for the observational data $H(z)$, BAO+CMB, and $H(z)$ +BAO+CMB, respectively

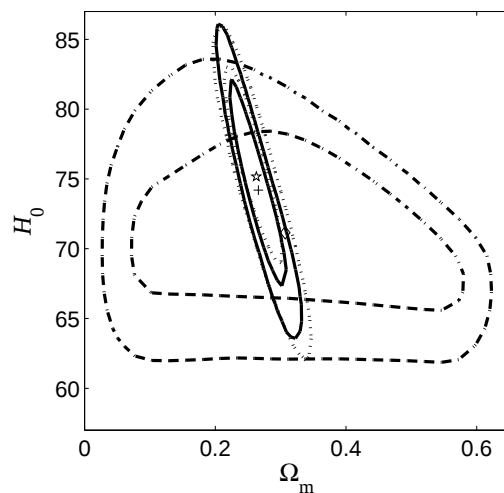


图 3 由 $H(z)$ (点划线)、BAO+CMB (点线) 和 $H(z)$ +BAO+CMB (实线) 数据组合得到的 Ω_m 与 H_0 参数的 1σ 和 2σ 误差等高线图, 其中菱形、星形与十字分别对应于 $H(z)$ 、BAO+CMB 和 $H(z)$ +BAO+CMB 数据组合下的最佳拟合值

Fig. 3 The marginalized 1σ and 2σ confidence contours of the parameters Ω_m and H_0 in the phenomenological interacting scenario, obtained from the combinations of all observational data $H(z)$ (dash-dotted line), BAO+CMB (dotted line), and $H(z)$ +BAO+CMB (solid line), where the diamond, star, and cross are the best-fit values for the observational data $H(z)$, BAO+CMB, and $H(z)$ +BAO+CMB, respectively

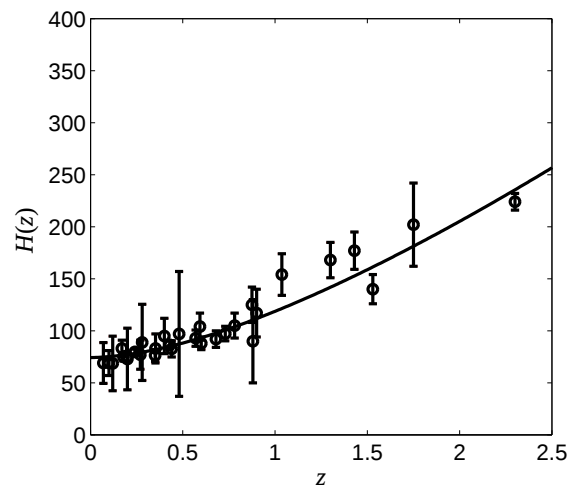


图 4 相互作用暗能量模型中 $H(z)$ 随红移的演化图(实线). 误差棒代表 31 个哈勃参数观测值, 模型参数来自 $H(z)$ +BAO+CMB 数据组合得到的最佳拟合值.

Fig. 4 The evolution of $H(z)$ as a function of z in the interaction dark energy model (solid line). The error bars are the 31 Hubble parameter measurements, and the model parameters are taken as the best-fit values from $H(z)$ +BAO+CMB.

表 1 使用 $H(z)$ 、BAO+CMB 和 $H(z)$ +BAO+CMB 数据组合对相互作用暗能量模型拟合得到的 γ 、 w_X 、 Ω_m 和 H_0 参数及 1σ 误差

Table 1 The marginalized 1σ errors of the parameters γ , w_X , Ω_m , and H_0 for the phenomenological interacting dark energy scenario, obtained from $H(z)$, BAO+CMB, and $H(z)$ +BAO+CMB combinations, respectively

Data	γ	w_X	Ω_m	H_0
$H(z)$	$-0.314^{+1.592}_{-1.557}(1\sigma)$	$-1.388^{+0.263}_{-0.376}(1\sigma)$	$0.307^{+0.157}_{-0.158}(1\sigma)$	$71.15^{+4.54}_{-4.50}(1\sigma)$
BAO+CMB	$0.143^{+0.112}_{-0.116}(1\sigma)$	$-1.409^{+0.306}_{-0.291}(1\sigma)$	$0.263^{+0.031}_{-0.03}(1\sigma)$	$75.16^{+4.86}_{-5.02}(1\sigma)$
$H(z)$ +BAO+CMB	$0.090^{+0.100}_{-0.098}(1\sigma)$	$-1.307^{+0.263}_{-0.269}(1\sigma)$	$0.266^{+0.028}_{-0.028}(1\sigma)$	$74.20^{+4.66}_{-4.56}(1\sigma)$

5 结论

在本文中, 我们结合最新的哈勃参量 $H(z)$ 观测数据、重子声学振荡(BAO)数据、普朗克卫星观测得到的宇宙微波背景辐射(CMB)数据, 利用马尔可夫链蒙特卡洛算法对一种相互作用暗能量模型进行了观测研究. 首先, 从 $H(z)$ +BAO+CMB 组合得到的相互作用耦合参数可知, 虽然最佳拟合值支持能量由暗物质向暗能量转移的可能性, 但巧合性问题在 1σ 误差范围内依然可以得到轻微缓解. 其次, 我们发现: 不同数据组合限制下得到的模型拟合结果吻合得很好, 引入哈勃参量观测数据可以显著改善对模型参数的限制结果. 在相互作用暗能量模型的理论框架下, 观测数据得到的结果表明 γ 、 Ω_m 和 H_0 三者相互关联, 并且在 1σ 置信范围内 Λ CDM 模型仍然与观测数据符合得很好. 最后, 分析结果显示: 在考虑了暗能量与物质之间的相互作用之后, Ia 型超新星数据和普朗克数据间对于哈勃常数 H_0 拟合结果的不一致性得到了一定程度的缓解.

参考文献

- [1] Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. AJ, 1998, 116: 1009
- [2] Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et al. ApJ, 1999, 517: 565
- [3] Spergel D N, Verde L, Peiris H V, et al. ApJS, 2003, 148: 175
- [4] Tegmark M, Blanton M R, Strauss M A, et al. ApJ, 2004, 606: 702
- [5] Eisenstein D J, Zehavi I, Hogg D W, et al. ApJ, 2005, 633: 560
- [6] Astier P, Guy J, Regnault N, et al. A&A, 2006, 447: 31
- [7] Spergel D N, Bean R, Doré O, et al. ApJS, 2007, 170: 377
- [8] Komatsu E, Dunkley J, Nolte M R, et al. ApJS, 2009, 180: 330
- [9] Amanullah R, Lidman C, Rubin D, et al. ApJ, 2010, 716: 712
- [10] Cao S, Zhu Z H. SCPMA, 2011, 54: 2260
- [11] Cao S, Covone G, Zhu Z H. ApJ, 2012, 755: 31
- [12] Cao S, Pan Y, Biesiada M, et al. JCAP, 2012, 03: 016
- [13] Gong Y G, Gao Q, Zhu Z H. MNRAS, 2013, 430: 3142
- [14] Ratra B, Peebles P J E. PRD, 1988, 37: 3406
- [15] Caldwell R R, Dave R, Steinhardt P J. PRL, 1998, 80: 1582
- [16] Caldwell R R. PLB, 2002, 545: 23
- [17] Caldwell R R, Kamionkowski M, Weinberg N N. PRL, 2003, 91: 071301
- [18] Armendariz-Picon C, Mukhanov V, Steinhardt P J. PRD, 2001, 63: 103510

- [19] Chiba T. PRD, 2002, 66: 063514
- [20] Feng B, Wang X L, Zhang X M. PLB, 2005, 607: 35
- [21] Guo Z K, Piao Y S, Zhang X M, et al. PLB, 2005, 608: 177
- [22] Feng B, Li M Z, Piao Y S, et al. PLB, 2006, 634: 101
- [23] 刘建伟, 王发印. 天文学报, 2011, 52: 467
- [24] Liu J W, Wang F Y. ChA&A, 2011, 36: 155
- [25] Wei H, Cai R G. PRD, 2006, 73: 083002
- [26] Cao S, Liang N, Zhu Z H. MNRAS, 2011, 416: 1099
- [27] Liao K, Li Z, Ming J, et al. PLB, 2013, 718: 1166
- [28] Farooq O, Mania D, Ratra B. ApJ, 2013, 764: 138
- [29] Adak D, Majumdar D, Pal S. MNRAS, 2014, 437: 831
- [30] Gong Y G, Gao Q. EPJC, 2014, 74: 2729
- [31] Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C, et al. A&A, 2014, 571: 16
- [32] Wang Y, Wang S. PRD, 2013, 88: 043522
- [33] Percival W J, Reid B A, Eisenstein D J, et al. MNRAS, 2010, 401: 2148
- [34] Blake C, Kazin E A, Beutler F, et al. MNRAS, 2011, 418: 1707
- [35] Wang B, Gong Y G, Abdalla E. PLB, 2005, 624: 141
- [36] Wang B, Zang J D, Lin C Y, et al. NuPhB, 2007, 778: 69
- [37] Rozas-Fernández A, Brizuela D, Cruz N. IJMPD, 2010, 19: 573
- [38] Copeland E J, Liddle A R, Wands D. PRD, 1998, 57: 4686
- [39] Amendola L. PRD, 1999, 60: 043501
- [40] Cai R G, Wang A Z. JCAP, 2005, 03: 002
- [41] Wei H, Cai R G, Zeng D F. CQGra, 2005, 22: 3189
- [42] Guo Z K, Zhang Y Z. PRD, 2005, 71: 023501
- [43] Wei H, Cai R G. PRD, 2005, 71: 043504
- [44] Wang B, Lin C Y, Abdalla E. PLB, 2006, 637: 357
- [45] Wei H, Cai R G. PLB, 2006, 634: 9
- [46] Wei H, Cai R G. JCAP, 2007, 09: 015
- [47] Guo Z K, Ohta N, Tsujikawa S. PRD, 2007, 76: 023508
- [48] Chen X M, Wang B, Pan N N, et al. PLB, 2011, 695: 30
- [49] Pan Y, Cao S, Gong Y G, et al. PLB, 2013, 718: 699
- [50] Cao S, Liang N. IJMPD, 2013, 22: 1350082
- [51] Dalal N, Abazajian K, Jenkins E, et al. PRL, 2001, 87: 141302
- [52] Pavon D, Sen S, Zimdahl W. JCAP, 2004, 05: 009
- [53] Jimenez R, Verde L, Treu T, et al. ApJ, 2003, 593: 622
- [54] Stern D, Jimenez R, Verde L, et al. JCAP, 2010, 02: 008
- [55] Gaztañaga E, Cabré A, Hui L. MNRAS, 2009, 399: 1663
- [56] Moresco M, Cimatti A, Jimenez R, et al. JCAP, 2012, 08: 006
- [57] Blake C, Brough S, Colless M, et al. MNRAS, 2012, 425: 405
- [58] Zhang C, Zhang H, Yuan S, et al. RAA, 2014, 14: 1221
- [59] Anderson L, Eric A, Stephen B, et al. MNRAS, 2014, 439: 83
- [60] Busca N G, Delubac T, Rich J, et al. A&A, 2013, 552: 18
- [61] Chuang C H, Wang Y. MNRAS, 2013, 435: 255
- [62] Crocco M, Gaztanaga E, Cabre A, et al. MNRAS, 2011, 417: 2577
- [63] Carnero A, Sanchez E, Crocco M, et al. MNRAS, 2012, 419: 1689
- [64] Liao K, Pan Y, Zhu Z H. RAA, 2013, 13: 2
- [65] Sánchez E, Carnero A, García-Bellido J, et al. MNRAS, 2011, 411: 277
- [66] Eisenstein D J, Hu W. ApJ, 1998, 496: 605
- [67] Lewis A, Bridle S. PRD, 2002, 66: 103511
- [68] Chen Y, Zhu Z H, Alcaniz J S, et al. ApJ, 2010, 711: 439

- [69] Riess A G, Macri L, Casertano S, et al. ApJ, 2011, 730: 119
 [70] Freedman W L, Madore B F, Scowcroft V, et al. ApJ, 2012, 758: 24

Testing the Interaction Dark Energy Model with $H(z)$ Data

PAN Yu^{1,2} LI Li¹ CAO Shuo³ PAN Na-na^{1,2} ZHANG Yi^{1,2}
 HU Zi-xuan¹

(1 College of Science, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065)
 (2 State Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)
 (3 Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

ABSTRACT We constrain an interaction dark energy model with the newly revised $H(z)$ data combining with the 7-year baryon acoustic oscillation (BAO) data and the cosmic microwave background (CMB) observations from the Planck first data release using the Markov Chain Monte Carlo (MCMC) method. The marginalized 1σ constraints of the combinations: $\Omega_m = 0.266^{+0.028}_{-0.028}(1\sigma)$, $\gamma = 0.090^{+0.100}_{-0.098}(1\sigma)$, $w_X = -1.307^{+0.263}_{-0.269}(1\sigma)$, and $H_0 = 74.20^{+4.66}_{-4.56}(1\sigma)$. The coupling parameter is $\gamma > 0$ which means the energy is transferred from dark matter to dark energy, and the coincidence problem is slightly alleviated in 1σ range. For comparison, we constrain this model with BAO+CMB observations and $H(z)$ data alone. The results are as follows: (1) The $H(z)$ data could put stricter constraint on the parameter γ . (2) The Λ CDM model remains the best, and the coupling parameter γ is correlated with other model parameters Ω_m and H_0 . (3) The tension of the constraining results of H_0 between the local distance ladder measurements and the Planck result could be alleviated by considering the interaction term.

Key words cosmology: dark energy, cosmology: cosmological parameters, cosmology: observations