



# 高红移类星体数据对相互作用暗能量的观测限制

兰明建<sup>1</sup>, 潘吉成<sup>2</sup>, 潘宇<sup>2\*</sup>, 何源<sup>2</sup>, 邹江宁<sup>2</sup>, 王平<sup>3</sup>

1. 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067;

2. 重庆邮电大学理学院, 重庆 400065;

3. 重庆邮电大学通信学院, 重庆 400065

\*联系人, E-mail: [panyu@cqupt.edu.cn](mailto:panyu@cqupt.edu.cn)

收稿日期: 2019-09-03; 接受日期: 2019-12-17; 网络出版日期: 2020-04-20

重庆市基础研究与前沿探索项目(编号: cstc2018jcyjAX0192)、重庆市自然科学基金面上项目(编号: cstc2019jcyj-msxmX0081)、重庆邮电大学校级项目(编号: A2017-66, A2019-66, A2019-267, W2016-30)、重庆市教委科学技术研究项目(编号: KJ1600409)和国家自然科学基金(编号: 61601074)资助

**摘要** 基于对120颗中等光度射电类星体(QSO)中致密结构的VLBI 观测结果( $0.46 < z < 2.76$ ), 结合Ia型超新星(SNIa)数据、2018年微波背景辐射(CMB)数据及重子声学振荡(BAO)数据, 我们对一种相互作用模型( $\xi IDE$ )进行了精确观测检验, 并期望对“巧合性”问题进行定量分析. 我们用不同红移段的QSO子样本(120颗QSO、70 颗低红移QSO、50颗高红移QSO)与SNIa的联合限制模型参数, 结果显示如下. (1)由三种组合给出的( $\xi, \omega$ )参数值可知宇宙学巧合性问题仍然没有被缓解,  $\Lambda CDM$ 仍然是与该观测符合最好的模型. (2)相较于单独使用SNIa数据作为宇宙学标准烛光, 高红移的标准直尺QSO数据加入到SNIa里(SNIa+QSO)可以将相互作用暗能量模型参数限制得更紧密, 从而进一步证实了中等亮度类星体作为标准直尺应用到宇宙学研究中的潜力. (3) SNIa与SNIa+QSO(低红移)之间不存在冲突问题. (4)在CMB+BAO+SNIa中引入射电类星体数据(CMB+BAO+SNIa+QSO), 我们得到的哈勃常数最佳拟合值与SNIa+QSO及CMB+BAO+SNIa 给出的结果在 $2\sigma$  误差范围内保持一致, 并且进一步缓解了超新星与Planck2018给出的 $H_0$ 存在的冲突问题.

**关键词** 相互作用暗能量, Ia型超新星, 高红移类星体数据, 巧合性问题

**PACS:** 98.80.Es, 98.80.-k, 98.54.Aj, 95.36.+x

## 1 引言

20世纪末, 我们对于Ia型超新星的观测发现宇宙在加速膨胀<sup>[1,2]</sup>, 此后对于宇宙微波背景辐射和宇宙大尺度结构的观测进一步证实了这一结果<sup>[3,4]</sup>. 为了解释这种宇宙加速膨胀现象, 人们引入了“暗

能量”的概念并由此展开大量的研究. 如果宇宙的加速膨胀是由暗能量引起的, 那么该特殊物质——能量应具有压强为负的特点. 目前宇宙学常数模型( $\Lambda CDM$ )与观测符合较好, 其暗能量状态方程参数(EOS) $\omega = p/\rho = -1$ . 但此理论模型具有巧合性问题, 即无法解释观测上给出的宇宙的物质密度与暗

**引用格式:** 兰明建, 潘吉成, 潘宇, 等. 高红移类星体数据对相互作用暗能量的观测限制. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 079501  
Lan M J, Pan J C, Pan Y, et al. Constraint on the interacting dark energy from the highly redshifted quasar data (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 079501, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0306](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0306)

能量密度具有相同的数量级的事实. 因为 $\Lambda CDM$ 理论上给出的物质密度以 $\frac{1}{a^3}$ 减小, 其中,  $a$ 为尺度因子,  $a = \frac{1}{z+1}$ ,  $z$ 为红移, 而暗能量密度是常数, 它并没有随着宇宙膨胀发生改变. 为此人们建立了多种暗能量模型 [5–13]试图克服 $\Lambda CDM$ 存在的问题. 基于强引力透镜效应等不同的观测手段 [14–18], 暗能量的观测检验已经取得了许多最新的成果 [19–21]. 在最近的工作中, 人们提出暗能量与暗物质之间发生相互作用的思想, 从唯象上建立了相互作用模型, 该类模型中提出如果暗能量转化为暗物质, 巧合性问题可能被缓解. 相互作用的观点也被一些观测迹象所证实. 例如, Bertolami 等人 [22–25]指出阿贝尔星群A586表明暗因子即暗能量与暗物质之间存在相互作用. 另外, Abdalla 等人 [26,27]发现利用驰豫星系团的光学、X射线和弱透镜数据也可以得到两者交换能量的信号.

研究相互作用暗能量仅仅依靠提出理论模型, 分析它们的动力学性质是不够的, 必须将天文观测数据应用在模型中, 找出模型参数范围 [28,29]. 目前, 大部分观测数据都属于低红移的观测, 对更加遥远的天体的观测是非常有限的. 本文采用120组中等光度类星体的红移区间在0.46–2.76的角尺度数据 [30]对相互作用唯象模型( $\xi IDE$ )参数进行观测限制. 该唯象模型中设能量密度 $\rho_x$ 与物质密度 $\rho_m$ 之比正比于尺度因子 $a$ 的 $\xi$ 倍即 $r \equiv \frac{\rho_x}{\rho_m} \propto a^\xi$ ,  $\xi$ 即为相互作用因子. Chen等人 [31]用超新星(SNIa)、微波背景辐射(CMB)、重子声学振荡(BAO)数据对该模型进行了限制, 并对是否考虑相互作用的必要性做了讨论. 结果显示巧合性问题没有得到缓解, 而如果宇宙从减速到加速的膨胀发生在红移 $z_T > 0.73$ 的范围, 那么考虑暗能量与暗物质的相互作用是有必要的. Cao等人 [29,32,33]使用哈勃参数数据(OHD)和超新星(SNIa)等数据组合限制模型参数, 结果表明巧合性问题仍然未能得到缓解. 在文献[31]的基础上, Wang等人 [34]用36组OHD与BAO, CMB, SNIa数据结合限制 $\xi IDE$ 模型. 该文主要通过36组OHD数据 [35]与580颗超新星数据(SNIa) [36]的研究对比, 对暗能量与暗物质之间的相互作用进行探讨, 宇宙学巧合性问题被轻微缓解. 在2015年Pan等人 [37]利用强引力透

镜的时间延迟数据限制三个相互作用模型( $\xi IDE$ ,  $\gamma_m IDE$ ,  $\gamma_d IDE$ ), 比较了三者与数据的符合程度, 得到了 $\gamma_m IDE$ 模型与观测最符合、并能轻微缓解了“巧合性问题”等有意义的结论.

在QSO数据方面, Cao等人首先提出按照内禀光度为判据对类星体进行分类的方法. 对于120个中等光度( $10^{27}\text{--}10^{28}$  W/Hz)的射电类星体而言, 其致密结构的线尺度 $l_m$ 对红移和光度的依赖关系均可以得到很好的消除, 这也意味着中等光度QSO可以作为一种标准尺子应用到宇宙学中( $0.50 < z < 3.0$ ) [30]. 类星体具有很高的宇宙学红移值, 这相比于传统的独立宇宙学探针而言在时间维度上有了很高的提升, 这对于研究宇宙的整体演化具有非常重要的作用. 随后的研究表明这种方法是普适且有效的: 精确检验暗能量动力学 [38,39], 检验暗能量与暗物质之间的相互作用 [40], 对修改引力模型的约束 [41,42]. 结合Gaussian processes处理的OHD数据可以对宇宙曲率 $\Omega_k$ 进行直接测量, 从而直接验证了宇宙在演化早期的平坦性 [43]. 他们还建立了多频射电类星体数据库, 其中包含单频数据库中58个中等光度类星体的多频段观测数据 [44].

Zheng等人 [40]利用现在QSO的数据对相互作用( $\gamma_m IDE$ ,  $\gamma_d IDE$ )模型做了观测检验, 并且QSO对相互作用的限制结果与其他数据的结果在误差范围内相一致, 但是QSO给出的相互作用因子 $1\sigma$ 在误差范围内使得巧合性问题更严重. 鉴于此, 相互作用仍然值得进一步探讨. 因此本文主要利用红移 $z$ 在0–3范围内的类星体(QSO)观测数据、超新星数据(SNIa)、Planck2018的微波背景辐射数据与重子声学振荡数据对 $\xi IDE$ 模型做观测检验, 探讨巧合性问题是否得到缓解.

## 2 相互作用暗能量模型

对于相互作用的形式的选择, 在满足量纲一致的条件下, 可以唯象地选取暗能量密度与暗物质密度的相互作用. 在本文的工作中, 主要考虑的相互作用暗能量模型如下: 在平坦FRW度规宇宙中, 暗物质和暗能量并非独立演化, 它们通过相互作用

项 $Q$ 进行能量交换. 物质密度 $\rho_m$ , 暗能量密度 $\rho_X$ ,

$$\dot{\rho}_X + 3H\rho_X = -Q, \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = Q, \quad (2)$$

上式满足总能量守恒,  $H$ 表示哈勃参量 $H(z) = \frac{a}{a}$ ,  $\dot{\rho}_X$ ,  $\dot{\rho}_m$ 分别表示 $\rho_X$ ,  $\rho_m$ 对时间的微分, 令 $r \equiv \frac{\rho_X}{\rho_m} \propto a^\xi$ , 同时可以得到 $Q$ 表达式 $Q = -H\rho_m(\xi + 3\omega)\Omega_X$ , 其中 $\omega$ 表示暗能量状态方程参数,  $\Omega_X$ 表示暗能量密度参数,  $\Omega_m$ 表示物质密度参数, 两者满足:  $\Omega_X = (1 - \Omega_m) / [1 - \Omega_m + \Omega_m(1 + z)^\xi]$ .

当 $\xi + 3\omega = 0$ 时, 表示不存在相互作用, 即为 $\Lambda CDM$ 模型, 当 $\xi + 3\omega > 0$ 时, 表示暗物质转化为暗能量( $Q < 0$ ), 巧合性问题依然严重, 当 $\xi + 3\omega < 0$ 时, 表示暗能量转化为暗物质( $Q > 0$ ), 可以缓解巧合问题<sup>[20-22]</sup>. 参数化的费里德曼方程表示为

$$\begin{aligned} E(z)^2 &= H^2/H_0^2 \\ &= (1+z)^3[\Omega_m + (1-\Omega_m)(1+z)^{-\xi}]^{-3\omega/\xi}. \end{aligned} \quad (3)$$

### 3 类星体数据及其他观测数据

#### 3.1 类星体数据(QSO)

本文采用Cao等人<sup>[44]</sup>从甚长基线巡天(VLBI)射电源类星体数据中提取的红移范围在 $0.46 < z < 2.76$ 、120组中等亮度的类星体角尺度-红移数据样本<sup>[31,34-45]</sup>作为标准直尺限制相互作用模型. 该组数据的谱指数范围为 $-0.38 \leq \alpha \leq 0.18$ , 观测亮度范围在 $10^{27} \text{ W/Hz} \leq L \leq 10^{28} \text{ W/Hz}$ . 该样本数据的角尺度 $\theta$ 范围为 $0.424 \leq \theta \leq 2.743$ 毫角秒, 其中 $\theta < 1.0$ 毫角秒的QSO样本占15%. Preston等人<sup>[46]</sup>在1985年给出了频段为2.29 GHz的致密射电源的总流量密度( $S_{\text{tot}}$ )与相关流量密度( $S_{\text{corr}}$ )的测量值, 而特征角尺度 $\theta = \frac{2\sqrt{-\ln \Gamma \ln 2}}{\pi B}$ , 其中 $B$ 为干涉基线, 可通过测量波长中提取<sup>[47,48]</sup>,  $\Gamma$ 为相关流量密度与总流量密度之比, 定义称为能见度模数, 即 $\Gamma = \frac{S_{\text{corr}}}{S_{\text{tot}}}$ . 根据 $\theta(\Gamma)$ 关系, Gurvit<sup>[47]</sup>分析构建了337个致密射电源的“角尺度-红移”关系图. 2006年Jackson和Jannetta<sup>[49]</sup>更新了红移样本, 得到613个红移区间在 $0.0035 \leq z \leq 3.787$ 范围内的致密射电源新样本. Cao等人在2017年采用

谱指数和观测亮度筛选法, 考虑光学对应体为致密射电源, 提取了120组中等亮度的角尺度-红移数据. Cao等人发现中等亮度类星体可以作为很好的标准直尺, 且该组数据具有比超新星等作为标准直尺的红移大的优势. 射电源作为标准直尺, 需要标定特征尺度 $l_m = lL^\beta(1+z)^n$ , 其中 $\beta$ 和 $n$ 是表征“角尺度-光度”和“角尺度- 红移”的两个参数, 文献[31]采用模型独立的方法标定了 $l_m = (11.03 \pm 0.25) \text{ pc}$ . 类星体致密结构的角尺度理论上可以表示为<sup>[31]</sup>

$$\theta_{\text{th}}(z) = \frac{l_m}{D_A(z)}, \quad (4)$$

其中 $D_A(z; p) = \frac{c}{H_0} \frac{1}{1+z} \int_0^z \frac{dz'}{E(z'; p)}$ ,  $l_m = (11.03 \pm 0.25) \text{ pc}$ .  $E(z', p)$ 表示宇宙学背景暗能量模型,  $H_0$ 为哈勃常数. 为了限制模型参数 $P$ , 我们采用 $\chi^2$ 最小值拟合法做数值计算:

$$\chi^2_{\text{QSO}} = \sum_{i=1}^{120} \frac{[\theta_{\text{obs}}(z_i) - \theta_{\text{th}}(z_i; p)]^2}{\sigma_\theta^2(z_i)}, \quad (5)$$

其中 $\theta_{\text{obs}}(z_i)$ 是观测到的角尺度大小,  $\sigma_\theta(z_i)$ 为总的不确定度, 包括观测误差和系统误差.  $\theta_{\text{obs}}(z_i)$ ,  $\sigma_\theta(z_i)$ 等数据详细信息请见参考文献[44]表1.

#### 3.2 超新星数据(SNIa)

另外, 本文采用了Supernova Cosmology Project (SCP)的580组Union2.1 SNIa数据<sup>[36]</sup>. SNIa中, 一般通过“距离模数” $\mu$ 描述超新星亮度观测的信息.

观测值 $\mu_{\text{obs}}$ 由视星等 $m$ 与绝对星等 $M$ 的差值给出:  $\mu_{\text{obs}} = m - M$ .

理论值 $\mu_{\text{th}}$ 也可以通过计算超新星的光度距离得到 $\mu_{\text{th}} = 5\log(d_L/\text{Mpc}) + 25$ .

理论模型中的各参数可以由 $\chi^2$ 最小值法计算

$$\chi^2_{\text{SNIa}} = \sum_i^{580} (\mu_{\text{obs}} - \mu_{\text{th}})^2 / \sigma_{\mu,i}^2, \quad (6)$$

其中 $\sigma_{\mu,i}$ 为超新星的观测误差.

## 4 高红移QSO数据等对暗能量模型参数的拟合结果

### 4.1 类星体数据(QSO)与超新星数据(SNIa)拟合结果

首先我们取哈勃常数 $H_0$ 为自由变量, 然后将120组QSO数据按红移 $z = 1.41$ 截断分类, 分成 $z > 1.41$ 的50组高红移QSO数据和70组 $z \leq 1.41$ 的低红移QSO数据. 并将这两类QSO子样本与580颗超新星结合进行对比限制模型参数, 讨论不同红移段的QSO数据对相互作用暗因子及模型其他参数的影响. 采用马尔可夫链蒙特卡罗算法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)及最大似然法, 利用上述观测数据来限制相互作用暗能量模型. SNIa+QSO数据组合下卡方值可表示为 $\chi^2 = \chi_{\text{SNIa}}^2 + \chi_{\text{QSO}}^2$ .

不同观测数据组合对 $\Omega_m$ ,  $H_0$ ,  $\xi$ 及 $\omega$ 的拟合值及等高线图形见表 1 与图 1 和 2.

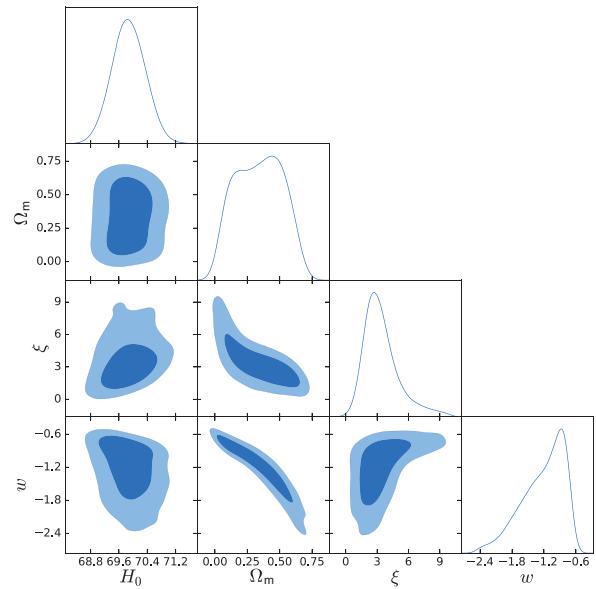
从表 1 可知, QSO数据加入到SNIa中后,  $\Omega_m$ ,  $\xi$ 和 $\omega$ 三个参数值的误差变小了, 且 $\omega = -1$ ,  $\xi + 3\omega = 0$ 包含在 $1\sigma$ 范围内. 对于中心值而言, SNIa+QSO, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)给出的限制结果是 $\xi + 3\omega > 0$ , 此结果与文献[20–30, 32, 33]给出的结果相符.

结果显示, 70组低红移的QSO数据与SNIa相结合给出的中心值 $\xi = 3.42$ ,  $\omega = -1.21$ ,  $\xi + 3\omega = -0.21$ , 50组高红移的QSO数据与SNIa相结合给出的中心值 $\xi = 4.3$ ,  $\omega = -1.03$ ,  $\xi + 3\omega = 1.21$ , 低红移与高红移QSO数据对 $\xi + 3\omega$ 的结果有差异, 相比之下, QSO低红移数据的限制结果更趋于 $\Lambda$ CDM模型, 而高红移QSO数据给出的参数结果显示巧合性问题更

**表 1**  $H_0$ 设为自由参数时, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)数据组合对相互作用模型参数的限制结果

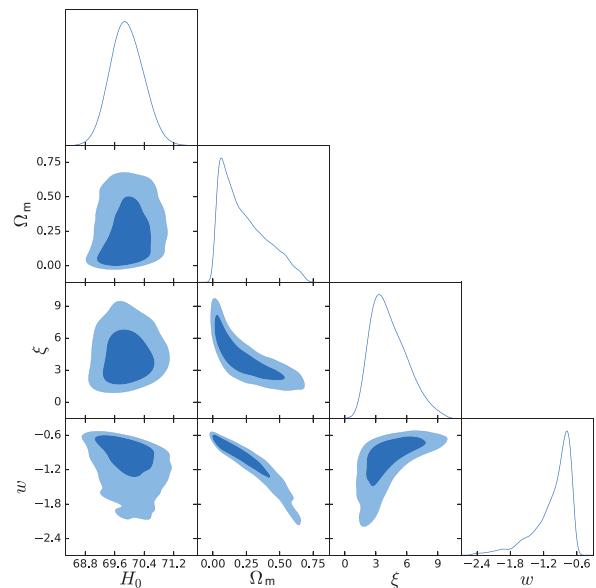
**Table 1** Constraints on the interacting dark energy models from SNIa+QSO(low  $z$ ) and SNIa+QSO(high  $z$ ) ( $H_0$  is taken as a free parameter)

$\xi IDE$	SNIa+QSO(低红移)	SNIa+QSO(高红移)
$\Omega_m$	$0.34^{+0.18}_{-0.18}(1\sigma)^{+0.32}_{-0.32}(2\sigma)$	$0.23^{+0.08}_{-0.22}(1\sigma)^{+0.34}_{-0.23}(2\sigma)$
$\xi$	$3.42^{+0.94}_{-1.9}(1\sigma)^{+3.9}_{-2.9}(2\sigma)$	$4.3^{+13}_{-2.2}(1\sigma)^{+3.7}_{-3.0}(2\sigma)$
$\omega$	$-1.21^{+0.51}_{-0.24}(1\sigma)^{+0.62}_{-0.82}(2\sigma)$	$-1.03^{+0.38}_{-0.10}(1\sigma)^{+0.45}_{-0.74}(2\sigma)$
$H_0$	$69.87^{+0.47}_{-0.47}(1\sigma)^{+0.93}_{-0.92}(2\sigma)$	$69.93^{+0.45}_{-0.45}(1\sigma)^{+0.90}_{-0.83}(2\sigma)$



**图 1** (网络版彩图)  $H_0$ 取作自由参数时, 70个低红移QSO与580个SNIa数据组合(SNIa+QSO(低红移))对相互作用暗能量模型参数的限制结果

**Figure 1** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from the combination of 70 low-redshift QSOs and 580 SNIa (SNIa+QSO(low  $z$ )) ( $H_0$  is taken as a free parameter).



**图 2** (网络版彩图)  $H_0$ 为自由参数时50个高红移QSO与580个SNIa数据组合(SNIa+QSO(高红移))对相互作用模型参数的限制结果

**Figure 2** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from the combination of 50 high-redshift QSOs and 580 SNIa (SNIa+QSO(high  $z$ )) ( $H_0$  is taken as a free parameter).

严重了. 两组数据组合限制的 $H_0$ 的参数值分别为: 当取SNIa+QSO(低红移)组合时得到的哈勃常数 $H_0 = 69.87^{+0.47}_{-0.47} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , SNIa+QSO(高红移)时 $H_0 = 69.93^{+0.45}_{-0.45} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . 值得注意的是, 我们的结果与Bennett等人<sup>[50]</sup>给出的哈勃参量限制结果 $H_0 = (69.6 \pm 0.7) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 在 $1\sigma$ 误差范围内相符, 并且与2017年探测到的双星并合引力波事件(GW170817)<sup>[51]</sup>给出的哈勃参量观测结果 $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 保持一致.

因此为了更精确限制讨论其他模型参数, 本文取不确定度为1%的哈勃常数 $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 为先验值. 对相互作用模型其他参数( $\Omega_m, \xi, \omega$ )做观测检验. 取定 $H_0$ 后得到SNIa+QSO(高红移)、SNIa+QSO(低红移)、580个SNIa与120个QSO结合(SNIa+QSO)三种数据组合限制的( $\Omega_m, \xi, \omega$ )参数值以及SNIa对三参数的限制结果如表2及图3-6所示.

三种数据组合给出的物质密度参数值在误差范围内与580组Union2.1的SNIa数据点限制宇宙学常数模型的拟合结果( $\Omega_m = 0.296^{+0.102}_{-0.18}$ )符合得很好<sup>[36]</sup>. 我们利用中等光度类星体作为标准直尺所得到的结果与Planck卫星的微波背景辐射(CMB)第一年数据<sup>[52]</sup>给出的 $\Lambda CDM$ 模型的最佳拟合参数值 $\Omega_m = 0.315 \pm 0.017(1\sigma)$ 结果相符, 且SNIa+QSO(低红移)给出的 $\Omega_m = 0.31^{+0.15}_{-0.23}(1\sigma)^{+0.31}_{-0.29}(2\sigma)$ 更趋近于Planck卫星CMB数据给出的值.

SNIa+QSO的结果与文献[20]中SNIa+BAO给出的物质密度参数、暗能量密度参数符合非常好, 说明QSO与BAO的数据对参数限制结果具有一致性.

对比图3与图4后可以发现, 中等亮度类星体作

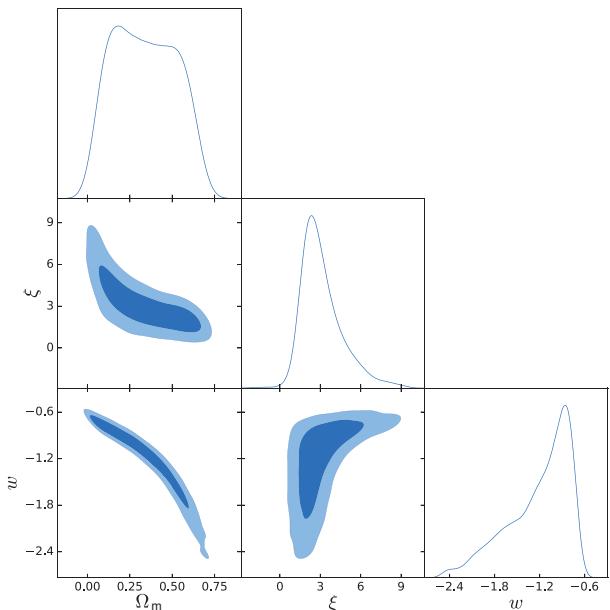
**表2**  $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 时, SNIa, SNIa+QSO, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)这4种组合对相互作用模型参数的限制结果

**Table 2** Constraints on the interacting dark energy models from SNIa, SNIa+QSO, SNIa+QSO(low  $z$ ) and SNIa+QSO(high  $z$ ) ( $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ )

$\xi IDE$	$\Omega_m$	$\xi$	$\omega$
SNIa	$0.34^{+0.18}_{-0.23}(1\sigma)^{+0.33}_{-0.31}(2\sigma)$	$3.12^{+0.83}_{-1.8}(1\sigma)^{+3.5}_{-2.5}(2\sigma)$	$-1.20^{+0.52}_{-0.19}(1\sigma)^{+0.58}_{-0.87}(2\sigma)$
SNIa+QSO	$0.28^{+0.12}_{-0.24}(1\sigma)^{+0.33}_{-0.27}(2\sigma)$	$3.97^{+0.81}_{-2.0}(1\sigma)^{+3.7}_{-2.5}(2\sigma)$	$-1.10^{+0.42}_{-0.12}(1\sigma)^{+0.47}_{-0.77}(2\sigma)$
SNIa+QSO(低红移)	$0.31^{+0.15}_{-0.23}(1\sigma)^{+0.31}_{-0.29}(2\sigma)$	$3.56^{+0.89}_{-1.8}(1\sigma)^{+3.3}_{-2.6}(2\sigma)$	$-1.16^{+0.45}_{-0.17}(1\sigma)^{+0.52}_{-0.78}(2\sigma)$
SNIa+QSO(高红移)	$0.29^{+0.18}_{-0.26}(1\sigma)^{+0.33}_{-0.28}(2\sigma)$	$3.87^{+0.87}_{-2.1}(1\sigma)^{+3.7}_{-2.6}(2\sigma)$	$-1.12^{+0.44}_{-0.14}(1\sigma)^{+0.48}_{-0.81}(2\sigma)$

为标准直尺加入超新星后所给出的结果( $\Omega_m, \omega$ )简并方向与超新星单独限制结果非常相近.

另外, 本文还探讨了SNIa+QSO与SNIa单独限制模型时取定 $\xi, \omega$ 后,  $\Omega_m$ 与 $\Omega_x$ 随红移的变化情况及 $r(z) = \Omega_m(z)/\Omega_x(z)$ 随红移的变化趋势. 从图7可知 $\Omega_m$ 和 $\Omega_x$ 的比值有相同的数量级.  $\Omega_x$ 随红移增大而减小,  $\Omega_m$ 随红移增大而增大,  $r(z) = \Omega_m(z)/\Omega_x(z)$ 也随红移增大而增大, 但对相同的红移处, 加入QSO数据后 $\Omega_x$ 数据变大了,  $\Omega_m$ 变小了, 因此相同红移处也变小, 该结论与文献[30]给出的结论相符合. 图8表示SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)限制



**图3** (网络版彩图) 580个SNIa对相互作用暗能量模型参数的限制结果

**Figure 3** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from 580 SNIa.

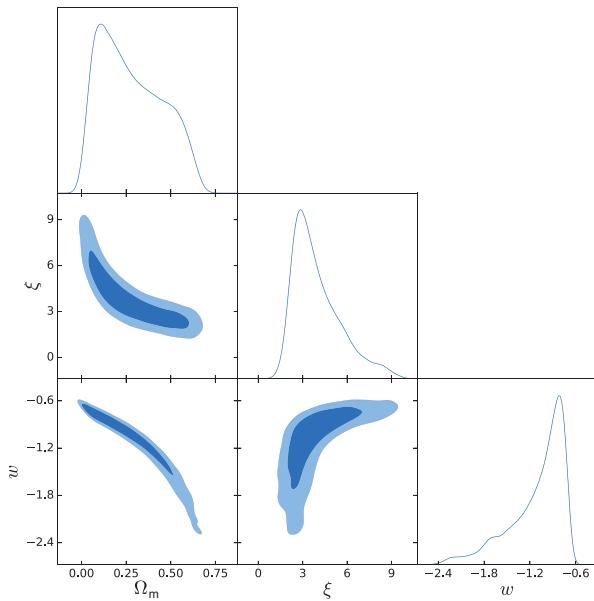


图 4 (网络版彩图)  $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  时 120 个 QSO 与 580 个 SNIa 数据组合(SNIa+QSO)对相互作用模型参数的限制结果

**Figure 4** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from the combination of 120 QSO and 580 SNIa data (SNIa+QSO) ( $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ).

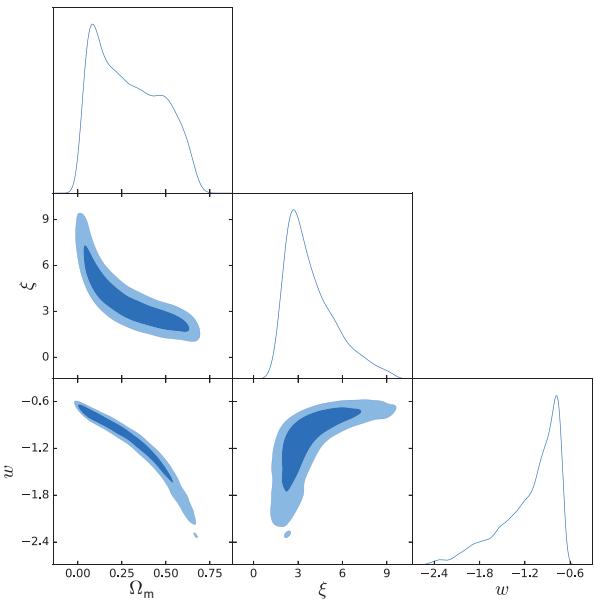


图 6 (网络版彩图)  $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  时 50 个高红移 QSO 与 580 个 SNIa 数据组合(SNIa+QSO(高红移))对相互作用模型参数的限制结果

**Figure 6** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from the combination of 50 high redshift QSO and 580 SNIa data (SNIa+QSO(high  $z$ )) ( $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ).

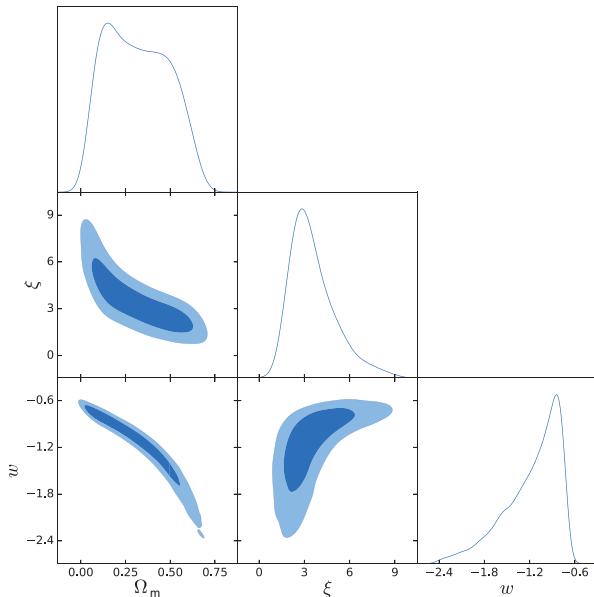


图 5 (网络版彩图)  $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  时 70 个低红移 QSO 与 580 个 SNIa 数据组合(SNIa+QSO(低红移))对相互作用模型参数的限制结果

**Figure 5** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from the combination of 70 low redshift QSO and 580 SNIa data (SNIa+QSO(low  $z$ )) ( $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ).

$\xi, \omega$  参数的二维等高线图形. 由图可知  $\xi$  随  $\omega$  增加而增大, 两者变化趋势相同.

如图 9 所示, 我们将 SNIa 与 SNIa+QSO(低 红移) 的限制结果作对比发现, 它们之间没有冲突问题, 并且在  $2\sigma$  误差范围内相符.

## 4.2 类星体数据(QSO)与超新星数据(SNIa)加入CMB和BAO拟合结果

当  $H_0$  取为自由参数时, 我们将 Planck 2018 给出的宇宙微波背景辐射(CMB)数据 [53] 和重子声学震荡(BAO)数据 [54-57] 作为先验性数据, 然后对比在 SNIa 中加入 QSO 前后对相互作用暗能量模型参数的影响, 再同 SNIa+QSO 对比得到的结果在表 3 中给出.

通过表 3 数值结果, 我们发现, 与 SNIa+QSO 与 CMB+BAO+SNIa+QSO 相比, 加入 CMB+BAO 后各参数的限制精度更高, 而相互作用项  $3\omega + \xi$  的中心值更趋近于 0, 这与宇宙学常数模型( $\Lambda$ CDM)符合更好. 另外, 通过图 10 我们可以看到, 在 CMB+BAO+

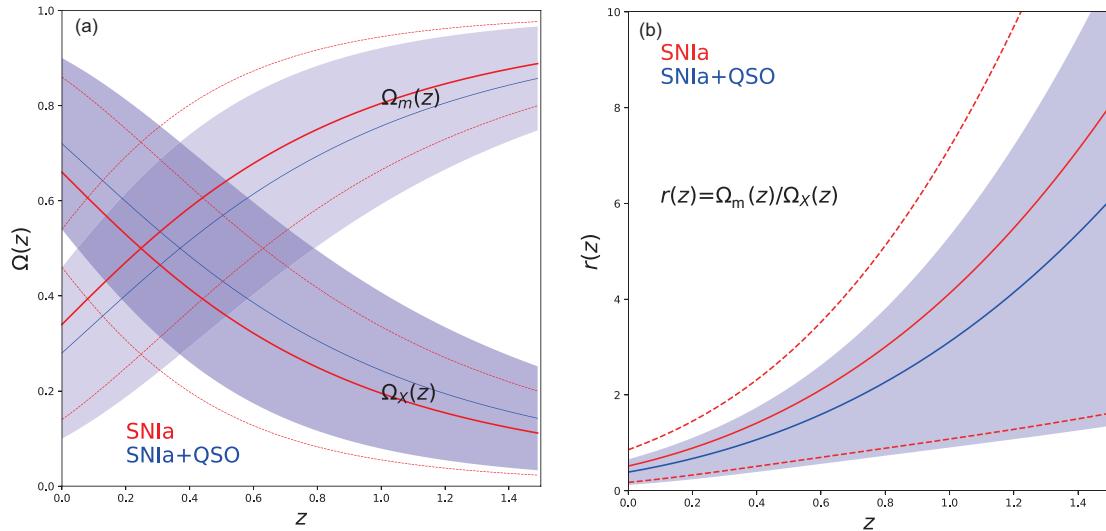


图7 (网络版彩图) (a) SNIa与SNIa+QSO两种组合下对 $\Omega_x$ ,  $\Omega_m$ 随红移的演化结果; (b)  $r(z)$ 随红移的演化在SNIa与SNIa+QSO两种组合下的情况

Figure 7 (Color online) (a) The evolution of SNIa and SNIa+QSO to  $\Omega_x$ ,  $\Omega_m$  with redshift; (b) the evolution of  $r(z)$  with redshift in SNIa and SNIa+QSO.

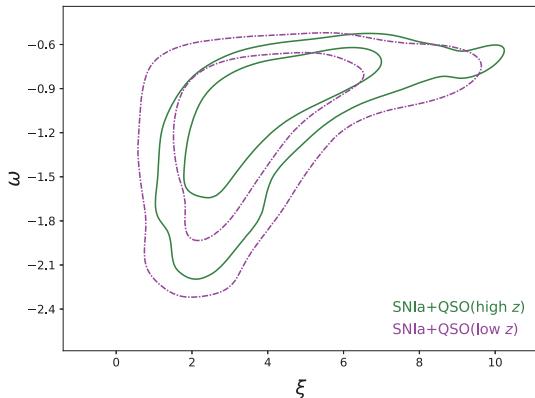


图8 (网络版彩图) SNIa+QSO(高红移)与SNIa+QSO(低红移)给出的 $\xi$ ,  $\omega$ 两参数的结果

Figure 8 (Color online) Constraints on  $\xi$ ,  $\omega$  parameters from SNIa+QSO(high  $z$ ) and SNIa + QSO(low  $z$ ).

SNIa中加入QSO之后, 图像在 $2\sigma$ 误差范围内并没有破坏图像原有的简并趋势, 表明CMB+BAO+SNIa+QSO在 $2\sigma$ 误差范围内与CMB+BAO+SNIa得到的结果是相符的. 表3列出的CMB+BAO+SNIa+QSO对 $H_0$ 的最佳值 $H_0=68.99 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 与SNIa+QSO中 $H_0$ 的最佳值在 $2\sigma$ 误差范围内相符. 以上结果虽然与最新的Planck2018给出的 $H_0 = (67.4 \pm 0.5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ <sup>[58]</sup>和Riss<sup>[59]</sup>给出的 $H_0 = (74.03 \pm$

$1.42) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 仍然存在冲突问题, 但缓解了两者存在的 $H_0$ 冲突问题.

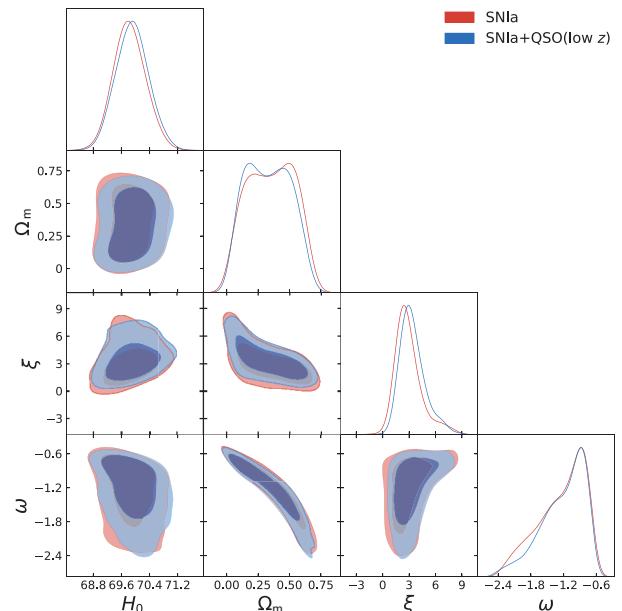


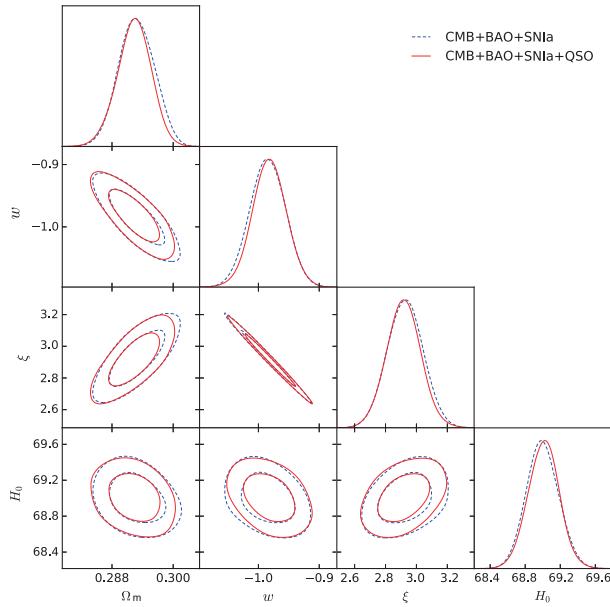
图9 (网络版彩图)  $H_0$ 为自由参数时, SNIa与SNIa+QSO(低红移)对相互作用模型参数的限制结果

Figure 9 (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from SNIa and SNIa + QSO(low  $z$ ) ( $H_0$  is taken as a free parameter).

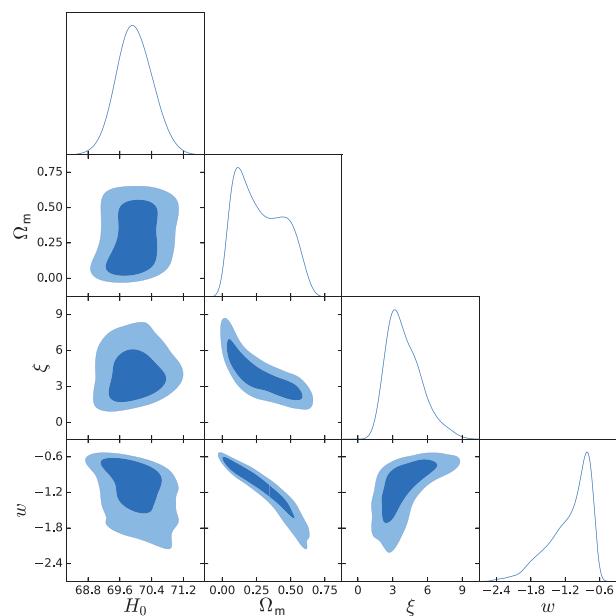
**表3**  $H_0$ 为自由参数时, SNIa+QSO, CMB+BAO+SNIa与CMB+BAO+SNIa+QSO这3种组合对相互作用模型的限制结果

**Table 3** Constraints on the interacting dark energy models from SNIa+QSO, CMB+BAO+SNIa and CMB+BAO+SNIa+QSO ( $H_0$  is taken as a free parameter)

$\xi IDE$	SNIa+QSO	CMB+BAO+SNIa	CMB+BAO+SNIa+QSO
$\Omega_m$	$0.30_{-0.24}^{+0.15}(1\sigma)^{+0.033}_{-0.29}(2\sigma)$	$0.292_{-0.007}^{+0.007}(1\sigma)^{+0.010}_{-0.010}(2\sigma)$	$0.292_{-0.007}^{+0.007}(1\sigma)^{+0.010}_{-0.010}(2\sigma)$
$\xi$	$3.83_{-1.9}^{+0.90}(1\sigma)^{+3.6}_{-2.6}(2\sigma)$	$3.00_{-0.26}^{+0.27}(1\sigma)^{+0.361}_{-0.318}(2\sigma)$	$3.00_{-0.26}^{+0.27}(1\sigma)^{+0.361}_{-0.318}(2\sigma)$
$\omega$	$-1.14_{-0.18}^{+0.47}(1\sigma)^{+0.57}_{-0.83}(2\sigma)$	$-0.978_{-0.062}^{+0.058}(1\sigma)^{+0.082}_{-0.090}(2\sigma)$	$-0.979_{-0.062}^{+0.060}(1\sigma)^{+0.081}_{-0.090}(2\sigma)$
$H_0$	$69.93_{-0.45}^{+0.45}(1\sigma)^{+0.90}_{-0.86}(2\sigma)$	$69.01_{-0.41}^{+0.37}(1\sigma)^{+0.58}_{-0.54}(2\sigma)$	$68.99_{-0.37}^{+0.38}(1\sigma)^{+0.57}_{-0.53}(2\sigma)$

**图10** (网络版彩图)当 $H_0$ 为自由参数时, CMB+BAO+SNIa与CMB+BAO+SNIa+QSO对相互作用模型参数的限制结果

**Figure 10** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from CMB+BAO+SNIa and CMB+BAO+SNIa+QSO ( $H_0$  is taken as a free parameter).

**图11** (网络版彩图)当 $H_0$ 为自由参数时, SNIa+QSO对相互作用模型的限制结果

**Figure 11** (Color online) Constraints on the interacting dark energy models from SNIa+QSO ( $H_0$  is taken as a free parameter).

( $69.6 \pm 0.7$ )  $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$ 相一致, 且高红移QSO数据给出的哈勃常数值的 $1\sigma$ 误差更小.

为了更精确地限制模型其他参数, 本文取不确定度为1%的哈勃常数 $H_0 = 69.6 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ 为先验值, 将SNIa与QSO结合, 分成SNIa+QSO, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)三种组合分别对模型参数( $\Omega_m, \xi, \omega$ )做限制得到各参数的限制结果如下.

(1) SNIa+QSO, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)三种数据组合给出的物质密度参数值在误差范围内与580组Union2.1的SNIa数据、Planck 2018数据给出的 $\Lambda$ CDM模型的最佳拟合参数值结

## 5 结论

本文主要基于580组SNIa数据和120组QSO数据, 利用MCMC算法对 $\xi IDE$ 相互作用模型进行观测检验. 用 $\chi^2$ 最小值拟合法实现模型中参数的数值拟合. 首先, 本文将120组QSO数据分成70组低红移( $z \leq 1.41$ )与50组高红移( $z > 1.41$ )的子样本分别与SNIa结合对模型参数做数值拟合, 当取SNIa+QSO(低红移)组合时, 得到的哈勃常数 $H_0 = 69.87_{-0.47}^{+0.47} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , 取SNIa+QSO(高红移)时, 哈勃常数 $H_0 = 69.93_{-0.45}^{+0.45} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . 两组数据给出的哈勃常数值与Bennett等人<sup>[50]</sup>给出的 $H_0 =$

果相符, 且SNIa+QSO(低红移)给出的物质密度参数值更趋于Planck2018的值. 另外, SNIa+QSO的物质密度参数结果与SNIa+BAO(重子声学振荡数据)给出的物质密度参数符合非常好. 说明QSO与CMB, BAO的数据对相互作用模型的物质密度参数限制能力一致.

(2) SNIa+QSO, SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)三种组合给出的( $\xi, \omega$ )中心值可判断 $\xi + 3\omega > 0$ , 表明暗物质转化为暗能量, 宇宙学巧合性问题仍然没有被缓解, 且相互作用为零( $\xi + 3\omega = 0$ )包含在 $1\sigma$ 范围之内, 表明 $\Lambda CDM$ 仍然是与该观测符合最好的模型. SNIa+QSO(低红移)( $z \leq 1.41$ )与SNIa+QSO(高红移)( $z > 1.41$ )相比, 低红移QSO数据给出的结果更趋于模型, 而SNIa+QSO(高红移)给出的结果表明巧合性问题更严重. SNIa+QSO(低红移)与SNIa+QSO(高红移)限制的 $\xi, \omega$ 参数二维等高线图形如图8所示. 可知 $\xi$ 随 $\omega$ 增加而增大, 两者给出的参数变化趋势相同.

(3) 采用SNIa+QSO与SNIa数据组合对比讨论. SNIa+QSO给出的各参数( $\Omega_m, \xi, \omega$ )的限制结果在68.3%的置信区间内误差更小, 说明QSO有将参数限制更紧密的能力. 对比图3与图4后可以发现, 中等亮度类星体作为标准直尺加入超新星后所给出的结果( $\Omega_m, \omega$ )简并方向与超新星单独限制结果的非常相近, 再一次证明中等亮度类星体数据可以作为标准直尺研究宇宙学.

致谢 感谢武汉大学郑晓刚博士后参与的讨论工作.

## 参考文献

- 1 Riess A G, Filippenko A V, Challis P, et al. *Astrophys J*, 1998, 116: 1009
- 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 S*, 2003, 148: 175–194
- 4 Tegmark M, Blanton M R, Strauss M A, et al. The three-dimensional power spectrum of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys J*, 2004, 606: 702–740
- 5 Caldwell R R, Dave R, Steinhardt P J. Cosmological imprint of an energy component with general equation of state. *Phys Rev Lett*, 1998, 80: 1582–1585
- 6 Liddle A R, Scherrer R J. Classification of scalar field potentials with cosmological scaling solutions. *Phys Rev D*, 1998, 59: 023509
- 7 Caldwell R R. A phantom menace? Cosmological consequences of a dark energy component with super-negative equation of state. *Phys Lett B*, 2002, 545: 23–29

(4) 讨论了SNIa与SNIa+QSO组合下对 $\Omega_x(z)$ ,  $\Omega_m(z)$ 随红移的演化结果及 $r(z) = \Omega_m(z)/\Omega_x(z)$ 随红移的演化情况. 如图7中可知 $\Omega_m$ 和 $\Omega_x$ 的比值有相同的数量级. 但 $\Omega_x$ 随红移增大而减小,  $\Omega_m$ 随红移增大而增大,  $r(z) = \Omega_m(z)/\Omega_x(z)$ 也随红移增大而增大, 但对相同的红移处, 加入QSO数据后 $\Omega_x$ 数据变大了,  $\Omega_m$ 变小了, 因此相同红移处 $r(z)$ 也变小, 说明高红移QSO数据限制参数给出的巧合性问题依然严重.

(5) 分别使用SNIa和SNIa+QSO(低红移)限制模型参数后, 对比所得的等高线图像, 发现它们之间没有冲突问题.

(6) 在CMB+BAO+SNIa中加入QSO后简并趋势没有明显变化, 其中 $H_0$ 的最佳值与SNIa+QSO(低红移)、SNIa+QSO(高红移)结果在 $2\sigma$ 误差范围内相符, 与Planck2018给出的 $H_0$ 最佳值存在冲突问题, CMB+BAO+SNIa+QSO缓解了超新星与Planck2018给出的 $H_0$ 存在的冲突问题.

(7) 将CMB+BAO+SNIa与CMB+BAO+SNIa+QSO对比可知, 加入QSO后, 对限制结果几乎没有变化, 主要因为QSO的数据不足、精度不高, 期待之后能够获得更多更高精度的QSO数据, 以期对模型参数做更精确的限制.

(8) SNIa+QSO与CMB+BAO+SNIa+QSO相比, 加入CMB+BAO后各参数的限制精度更高, 而相互作用项 $3\omega + \xi$ 的中心值更趋近于0, 与宇宙学常数模型符合得更好.

- 8 Carroll S M, Hoffman M, Trodden M. Can the dark energy equation-of-state parameter  $w$  be less than  $-1$ ? *Phys Rev D*, 2003, 68: 023509
- 9 Feng B, Wang X, Zhang X. Dark energy constraints from the cosmic age and supernova. *Phys Lett B*, 2005, 607: 35–41
- 10 Li M, Wang Y. Quantum UV/IR relations and holographic dark energy from entropic force. *Phys Lett B*, 2010, 687: 243–247
- 11 Yang T, Guo Z K, Cai R G. Reconstructing the interaction between dark energy and dark matter using Gaussian processes. *Phys Rev D*, 2015, 91: 123533
- 12 Wei H. Cosmological evolution of quintessence and phantom with a new type of interaction in dark sector. *Nucl Phys B*, 2011, 845: 381–392
- 13 Wang B, Gong Y, Abdalla E. Transition of the dark energy equation of state in an interacting holographic dark energy model. *Phys Lett B*, 2005, 624: 141–146
- 14 Cao S, Zhu Z H, Liang N. Observational constraints on interacting dark matter model without dark energy. *Astron Astrophys*, 2011, 529: A61
- 15 Cao S, Zhu Z H. Constraints on cosmological models from lens redshift data. *Astron Astrophys*, 2012, 538: A43
- 16 Cao S, Covone G, Zhu Z H. Testing the dark energy with gravitational lensing statistics. *Astrophys J*, 2012, 755: 31
- 17 Cao S, Pan Y, Biesiada M, et al. Constraints on cosmological models from strong gravitational lensing systems. *J Cosmol Astropart Phys*, 2012, 2012(03): 016
- 18 Cao S, Biesiada M, Gavazzi R, et al. Cosmology with strong-lensing systems. *Astrophys J*, 2015, 806: 185
- 19 Cao S, Zhu Z H. Cosmic equation of state from combined angular diameter distances: Does the tension with luminosity distances exist? *Phys Rev D*, 2014, 90: 083006
- 20 Cao S, Li X, Biesiada M, et al. Test of parameterized post-Newtonian gravity with galaxy-scale strong lensing systems. *Astrophys J*, 2017, 835: 92
- 21 Cao S, Qi J, Biesiada M, et al. Testing the speed of light over cosmological distances: The combination of strongly lensed and unlensed type Ia supernovae. *Astrophys J*, 2018, 867: 50
- 22 Bertolami O, Gil Pedro F, Le Delliou M. Dark energy-dark matter interaction and putative violation of the equivalence principle from the Abell cluster A586. *Phys Lett B*, 2007, 654: 165–169
- 23 Bertolami O, Gil Pedro F, Le Delliou M. The Abell cluster A586 and the detection of violation of the equivalence principle. *Gen Relativ Gravit*, 2009, 41: 2839–2846
- 24 Le Delliou M, Bertolami O, Pedro F G. Dark energy-dark matter interaction from the abell cluster A586 and violation of the equivalence principle. *AIP Conf Proc*, 2007, 957: 421
- 25 Bertolami O, Gil Pedro F, Le Delliou M. Dark energy-dark matter interaction from the Abell cluster A586. *EAS Publications Ser*, 2008, 30: 161–167
- 26 Abdalla E, Abramo L R, Sodré Jr. L, et al. Signature of the interaction between dark energy and dark matter in galaxy clusters. *Phys Lett B*, 2009, 673: 107–110
- 27 Abdalla E, Abramo L R, de Souza J C C. Signature of the interaction between dark energy and dark matter in observations. *Phys Rev D*, 2010, 82: 023508
- 28 Cao S, Zhu Z H, Zhao R. Testing and selecting dark energy models with lens redshift data. *Phys Rev D*, 2011, 84: 023005
- 29 Cao S, Liang N, Zhu Z H. Testing the phenomenological interacting dark energy with observational  $H(z)$  data. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 416: 1099–1104
- 30 Cao S, Zheng X, Biesiada M, et al. Ultra-compact structure in intermediate-luminosity radio quasars: Building a sample of standard cosmological rulers and improving the dark energy constraints up to  $z \sim 3$ . *Astron Astrophys*, 2017, 606: A15
- 31 Chen Y, Zhu Z H, Alcaniz J S, et al. Using a phenomenological model to test the coincidence problem of dark energy. *Astrophys J*, 2010, 711: 439–444
- 32 Cao S, Liang N. Interaction between dark energy and dark matter: Observational constraints from OHD, BAO, CMB and SNe Ia. *Int J Mod Phys D*, 2013, 22: 1350082
- 33 Cao S, Chen Y, Zhang J, et al. Testing the interaction between baryons and dark energy with recent cosmological observations. *Int J Theor Phys*, 2015, 54: 1492–1505
- 34 Wang J F, Chen S Y, Pan Y, et al. Constraints on the interacting dark energy with Hubble parameter data and other observational data (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3337–3344 [汪金芳, 陈诗宇, 潘宇, 等. 哈勃参量观测数据及其他数据对相互作用暗能量的观测限制. 科学通报, 2015, 60: 3337–3344]
- 35 Yuan S, Chen Z, Zhang T J. Cosmological constraints on  $\Lambda$ CDM from observational hubble data: Markov chain Monte Carlo approach (in Chinese). *J B Norm Univ (Nat Sci)*, 2012, 48: 372–377 [袁硕, 陈震, 张同杰. 利用哈勃参量观测数据限制 $\Lambda$ CDM宇宙学模型: MCMC方法. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48: 372–377]

- 36 Suzuki N, Rubin D, Lidman C, et al. The Hubble space telescope cluster supernova survey. V. Improving the dark-energy constraints above  $z > 1$  and building an early-type-hosted supernova sample. *Astrophys J*, 2012, 746: 85
- 37 Pan Y, Cao S, Li L. Constraints on interacting dark energy from time delay lenses. *Int J Mod Phys D*, 2016, 25: 1650003
- 38 Li X, Cao S, Zheng X, et al. Testing and selecting cosmological models with ultra-compact radio quasars. *Eur Phys J C*, 2017, 77: 677
- 39 Ma Y, Zhang J, Cao S, et al. The generalized cosmic equation of state: A revised study with cosmological standard rulers. *Eur Phys J C*, 2017, 77: 891
- 40 Zheng X, Biesiada M, Cao S, et al. Ultra-compact structure in radio quasars as a cosmological probe: A revised study of the interaction between cosmic dark sectors. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017(10): 030
- 41 Baranov S P, Jung H, Lipatov A V, et al. Testing the parton evolution with the use of two-body final states. *Eur Phys J C*, 2017, 77: 02
- 42 Xu T, Cao S, Qi J, et al. A new test of  $f(R)$  gravity with the cosmological standard rulers in radio quasars. *J Cosmol Astropart Phys*, 2018, 2018(06): 042
- 43 Cao S, Qi J, Biesiada M, et al. Milliarcsecond compact structure of radio quasars and the geometry of the Universe. *Phys Dark Universe*, 2019, 24: 100274
- 44 Cao S, Biesiada M, Qi J, et al. Cosmological investigation of multi-frequency VLBI observations of ultra-compact structure in  $z \sim 3$  radio quasars. *Eur Phys J C*, 2018, 78: 749
- 45 Cao S, Biesiada M, Jackson J, et al. Measuring the speed of light with ultra-compact radio quasars. *J Cosmol Astropart Phys*, 2017, 2017(02): 012
- 46 Preston R A, Morabito D D, Williams J G, et al. A VLBI survey at 2.29 GHz. *Astron J*, 1985, 90: 1599–1603
- 47 Gurvits L I. Apparent milliarcsecond sizes of active galactic nuclei and the geometry of the universe. *Astrophys J*, 1994, 425: 442
- 48 Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy. Cham: Springer Nature, 1986
- 49 Jackson J C, Jannetta A L. Legacy data and cosmological constraints from the angular-size/redshift relation for ultracompact radio sources. *J Cosmol Astropart Phys*, 2006, 2006(11): 002
- 50 Bennett C L, Larson D, Weiland J L, et al. The 1% concordance Hubble constant. *Astrophys J*, 2014, 794: 135
- 51 Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. *Nature*, 2017, 551: 85–88
- 52 Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C, et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron Astrophys*, 2014, 571: A16
- 53 Chen L, Huang Q G, Wang K. Distance priors from planck final release. arXiv: [1808.05724](#)
- 54 Beutler F, Blake C, Colless M, et al. The 6 dF galaxy survey: Baryon acoustic oscillations and the local Hubble constant. *Mon Not R Astron Soc*, 2011, 416: 3017–3032
- 55 Ross A J, Samushia L, Howlett C, et al. The clustering of the SDSS DR7 main Galaxy sample—I. A 4 per cent distance measure at  $z = 0.15$ . *Mon Not R Astron Soc*, 2015, 449: 835–847
- 56 Anderson L, Aubourg É, Bailey S, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Baryon acoustic oscillations in the data releases 10 and 11 galaxy samples. *Mon Not R Astron Soc*, 2014, 441: 24–62
- 57 Bautista J E, Busca N G, Guy J, et al. Measurement of baryon acoustic oscillation correlations at  $z=2.3$  with SDSS DR12 Ly $\alpha$ -forests. *Astron Astrophys*, 2017, 603: A12
- 58 Aghanim N, et al. (Planck Collaboration). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. arXiv: [1807.06209v2](#)
- 59 Riess A G, Casertano S, Yuan W, et al. Large magellanic cloud cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the hubble constant and stronger evidence for physics beyond  $\Lambda$ CDM. *Astrophys J*, 2019, 876: 85

# Constraint on the interacting dark energy from the highly redshifted quasar data

LAN MingJian<sup>1</sup>, PAN JiCheng<sup>2</sup>, PAN Yu<sup>2\*</sup>, HE Yuan<sup>2</sup>, ZOU JiangNing<sup>2</sup> & WANG Ping<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University,  
Chongqing 400067, China;*

<sup>2</sup>*College of Science, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

<sup>3</sup>*School of Communication and Information Engineering of Science, Chongqing University of Posts and Telecommunication,  
Chongqing 400065, China*

In this study, we investigated observational constraints on the phenomenological interacting dark energy model ( $\xi$ IDe) and seek the quantitative analysis of the coincidence problem on the basis of the VLBI observations of the compact structure in 120 intermediate-luminosity quasars (QSO) covering the redshift range of  $0.46 < z < 2.76$ , combined with the type Ia supernovae (SNIa), the baryonic acoustic oscillation (BAO), and the cosmic microwave background (CMB) observation from 2018 results. The combined analysis with the full sample and sub-samples of QSO and SNIa defined by different redshifts (120 QSO, 70 low-redshift QSO, 50 high-redshift QSO) show that: (1) As can be seen from the constraint on the two parameters ( $\xi$ ,  $\omega$ ) from three data combinations, the coincidence problem is not alleviated, and the standard  $\Lambda$ CDM model without any interaction remains a good fit for the recent observational data; (2) compared with the current SNIa standard candle data, the combination of the intermediate-luminosity radio quasars (SNIa + QSO) provides more stringent constraints on this IDE scenario, which further indicates the potential of intermediate-luminosity quasars acting as an effective cosmological standard ruler at much higher redshifts; (3) there is no clear tension between SNIa and SNIa + QSO (low  $z$ ); (4) when combined with CMB and BAO observations, the derived Hubble constant from CMB + BAO + SNIa + QSO agrees well with that from SNIa + QSO and CMB + BAO + SNIa (within  $2\sigma$ ). Furthermore, the full combination of different cosmological probes (CMB + BAO + SNIa + QSO) may contribute to alleviate the tension of  $H_0$  between the recent Planck and SNIa measurements.

**interacting dark energy, type Ia supernova, high-redshift quasar data, coincidence problem**

**PACS:** 98.80.Es, 98.80.-k, 98.54.Aj, 95.36.+x

**doi:** [10.1360/SSPMA-2019-0306](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0306)