

# Euclid 实验数据对相互作用暗能量模型的预测限制<sup>\*</sup>

马晓娇 代纪平 夏俊卿<sup>†</sup>

(北京师范大学天文系, 100875, 北京)

**摘要** 模拟了加入非线性理论不确定性误差的 Euclid 巡天数据, 同时结合宇宙微波背景辐射(CMB)、BAO 和 Ia 型超新星(SNe Ia), 利用马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)算法, 在完整的参数空间下对  $w$ CDM 模型进行预测限制, 对暗能量与暗物质间的相互作用性质进行探讨. 为了研究 Euclid 巡天项目对不同相互作用暗能量模型的耦合常数( $\beta$ )、暗能量状态方程( $w$ )等参数的限制效果, 采用 CMB+BAO+SNe Ia 和 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合对 4 个相互作用暗能量模型进行了限制对比, 得到结论如下: 1) 除了  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_{\text{de}}$  模型, 其他模型在加入 Euclid 模拟数据后, 模型参数均得到了更好的限制. 2) 在各个模型中, 用 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合限制时,  $\beta$  均在  $1.2\sigma$  置信区间内不为 0; 当用 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合限制时, 在  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{de}}$ 、 $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{de}}$ 、 $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_{\text{de}}$  这 3 个模型中, 均在  $1\sigma$  置信区间内不为 0; 在  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_{\text{de}}$  模型中,  $\beta$  在  $1.9\sigma$  置信区间内不为 0. Euclid 巡天实验结合 CMB、超新星、哈勃参量的直接测量等宇宙学探针, 将会帮助进一步了解暗能量、暗物质性质.

**关键词** 相互作用暗能量模型; Euclid 星系巡天; 非线性理论不确定性误差

中图分类号 P159.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020132

## 0 引言

近年来, 普朗克卫星对宇宙微波背景辐射的各向异性进行了高精度观测, 当与 Ia 型超新星(SNe Ia)、重子声学振荡(BAO)、大尺度结构的统计分布(LSS)、弱引力透镜(WL)和 Lyman-森林等多种宇宙探针联合限制标准宇宙学参数时, 精度提高了很多, 从而使宇宙学成为一门精确科学<sup>[1]</sup>. 但目前观测数据表明, 宇宙中 95% 以上是研究者们了解甚少的暗物质和暗能量, 其中具有负压强的暗能量占整个宇宙密度 70% 以上. 迄今为止, 基于引力效应, 间接探测到暗能量的状态方程为  $w \equiv p/\rho \approx -1$ , 但其本质是什么仍然无法解释. 目前较多观测支持标准宇宙学模型( $\Lambda$ CDM 模型), 即暗能量为宇宙学常数  $\Lambda$ , 该模型下状态方程为  $w = -1$ , 这与观测结果是自洽的, 但在理论上仍然存在一些问题, 譬如宇宙巧合性问题<sup>[2]</sup>和古老类星体带来的宇宙年龄问题<sup>[3]</sup>等. 为了解决和缓解巧合性问题, 幽灵模型<sup>[4-5]</sup>、精质模型<sup>[6-7]</sup>等一类耦合标量场暗能量模型相继被提出. 此外, 另一类通过唯象描述的方法构造出的暗能量模型——相互作用暗能量模型, 也被广泛研究讨论. 这类模型基于假设宇宙在高密度、高能标时具有较大的相

互作用强度, 认为暗能量和暗物质之间存在某种非引力耦合的相互作用, 从而根据合理的假设来构造相互作用项  $Q$ , 例如假定  $Q$  正比于暗能量密度( $Q \propto \rho_{\text{de}}$ )、暗物质密度( $Q \propto \rho_{\text{c}}$ )、哈勃膨胀率( $Q \propto H$ )等. 与此同时, 在对宇宙学扰动问题的研究中, 如果考虑暗物质与暗能量之间的相互作用, 会使得暗能量在暗物质结团以及运动过程中, 增加一个除引力之外的作用, 这也将会对宇宙大尺度结构的生长和形成产生一系列影响. 例如宇宙微波背景辐射温度各向异性角功率谱中, 声学峰值的位置与幅度、大尺度结构物质功率谱的形状等<sup>[8-9]</sup>.

对于相互作用暗能量模型, 目前从距离测量和宇宙结构演化测量 2 方面已经给出了一些限制. 距离探针主要包括 Ia 型超新星、重子声学振荡和哈勃参量的直接测量, 而结构演化探针主要包括宇宙微波背景辐射、弱引力透镜、红移空间畸变<sup>[9]</sup>. 截至目前, 已有大量关于利用宇宙微波背景辐射、Ia 型超新星、重子声学振荡、引力波、哈勃参量观测数据、类星体等宇宙探针来研究暗能量相互作用模型的研究成果, 如: Cao 等<sup>[10]</sup>结合直接测量的哈勃参数、Ia 型超新星和重子声学振荡对  $Q \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}$  和  $Q \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}$  进行

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划资助项目(2017YFA0402600)

<sup>†</sup> 通信作者: 夏俊卿(1983—), 男, 博士, 教授. 研究方向: 宇宙学的理论模型分析和实验数据处理. E-mail: xiajq@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-04-11

了限制,在68%置信区间的限制结果分别为

$$\{w, \beta\} = \{-0.9378^{+0.1726}_{-0.1619}, 0.0073^{+0.0048}_{-0.0034}\},$$

$$\{w, \beta\} = \{-1.1502^{+0.1521}_{-0.1641}, -0.0137^{+0.0147}_{-0.0153}\}^{[10]}.$$

Costa 等<sup>[11]</sup>利用 J-PAS 巡天模拟数据对相互作用暗能量模型  $Q \propto \rho_c$ 、 $Q \propto \rho_{de}$ 、 $Q \propto \rho_{de} + \rho_c$  进行了预测限制. J-PAS 主要是对高红星系、辐射星系和类星体进行光度红移测量,在68%置信区间上的  $w$  和  $\beta$  误差分别为  $\{\pm 0.074, \pm 0.037\}$ 、 $\{\pm 0.058, \pm 0.016\}$ 、 $\{\pm 0.074, \pm 0.037\}$ <sup>[11]</sup>. 就本质而言,因为暗能量与暗物质的相互作用目前只是一种理论假设,暗能量与暗物质之间是否真的存在相互作用还需要更多的实验数据来验证. 除此之外,在目前已被提出众多的暗能量相互作用模型中,究竟哪种模型能够更加真实地反映相互作用过程,以及各个模型中的自由参数是多大,这些问题都需要解决<sup>[9]</sup>. 解决这些问题的关键在于精确测量暗能量的性质,目前国际和国内都已提出一些针对暗能量观测的实验,其中包括多国合作的平方千米阵(SKA)<sup>[12]</sup>、欧空局的空间望远镜 Euclid<sup>[13]</sup>、国内的2 m 空间光学星系巡天(CSS-OS)<sup>[14]</sup>等. 这些实验将结合星系团、宇宙剪切、21 cm 中性氢强度映射等,以前所未有的精度测量物质功率谱和结构的增长. 大量的观测数据有助于测试验证众多模型,同时会促进对暗能量物理本质的深入理解. 其中, Euclid 是 ESA 计划于2022年开始的一个空间星系巡天项目,它将用星系团和宇宙剪切2个巡天来探测宇宙膨胀率和宇宙结构增长,星系团包括重子声学振荡和宇宙红移畸变,而宇宙剪切的探针为弱引力透镜.

星系团巡天的主要原理是通过测量宇宙中大尺度物质分布,从而得到星系的物质密度关联函数和功率谱,然后从中提取重子声学振荡和红移畸变信号,这样便可以测量不同红移处的哈勃膨胀率和宇宙结构增长率. 引力效应指的是背景星系的光经受到前景天体引力场作用而产生偏折和会聚. Euclid 宇宙剪切巡天实验主要通过观测统计高红移背景星系形变,得到弱引力透镜信号的空间关联函数,之后进一步得到物质分布的空间关联函数,也就能了解宇宙结构演化历史<sup>[15]</sup>. Euclid 的巡天面积  $15000 (\text{°})^2$  将探测到约100亿个源(包括弱引力透镜巡天将能探测到的 >10 亿个源和星系团巡天将能探测到的数千亿的源)<sup>[12]</sup>. 这也将帮助进一步研究暗物质和暗能量的性质和其他宇宙学问题. 但也带来一个主要难题,由于物理过程的复杂性(如星系内在排列<sup>[16]</sup>和

重子反馈<sup>[17-18]</sup>)所引起非线性尺度上理论的不确定性. 这要求研究者在利用 Euclid 模拟数据对宇宙学参数进行限制预测时,需要更好地模拟小尺度(非线性)理论误差. 目前在暗能量、修改引力、中微子等方向已经获得一些进展<sup>[19-21]</sup>,但可靠的预测仍然很难得到. 在模拟过程中,要么只保留线性部分,要么保留中度的非线性误差和系统误差. 其中, Sprenger 等<sup>[22]</sup>提出了一种新的方法来模拟小尺度上的非线性不确定理论误差,并且用 Euclid 和 SKA 巡天模拟数据对标准宇宙学模型和中微子质量进行了预测,宇宙学参数和中微子质量都得到了很好的限制.

此外,对相互作用暗能量模型而言,大尺度不稳定性是一个亟需解决的理论问题. 在宇宙早期超粒子视界尺度时,某些相互作用暗能量模型中,曲率扰动会突然快速增长,从而导致大尺度发散<sup>[23]</sup>. 对这一问题,大部分的解决方法是计算参数空间中的某些部分,从而避开出现发散的参数空间. 例如,在  $Q \propto \rho_{de}$  模型中只计算  $w < -1$  的参数空间<sup>[23]</sup>,在  $Q \propto \rho_c$  模型中只计算  $w > -1$  和  $\beta > 0$  的参数空间<sup>[24]</sup>. 为了使暗能量的声速平方不为负数,通常假设暗能量为非绝热流体,但这也会导致在  $w > -1$  时会发生发散<sup>[25-26]</sup>. 之后,随着参数化后的弗里德曼(parametrized post-Friedmann, PPF)方法引入,不再通过定义暗能量声速来计算暗能量压强扰动. 发散问题得到了有效解决,也能用观测数据来研究相互作用暗能量模型的全参数空间<sup>[27-29]</sup>. 现在的研究发现,该方法中如果相互作用项与暗能量的速度扰动有关,即当暗能量状态参数方程具有更一般的形式时,暗物质的密度扰动和物质功率谱在  $w > -1$  时将发生发散,于是提出了一种新的更普遍适用的模型<sup>[30]</sup>. 因此,在本研究中,将会采用这种新的模型方法,利用模拟 Euclid 的星系团巡天和宇宙剪切巡天数据,基于马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)算法,在完整参数空间下,对相互作用暗能量模型进行预测检验,对暗能量与暗物质间的相互作用性质进行探讨.

## 1 相互作用暗能量模型

自然界的物质间普遍都存在相互作用. 为了不失一般性,引入一种假设:除了引力效应,暗能量可能以某种直接的、非引力耦合的方式与暗物质发生相互作用. 在平坦 FRW (Friedmann-Robertson-Walker) 度规宇宙中,暗物质和暗能量通过相互作用项  $Q$  进行能量交换,而不再是各自独立演化<sup>[31]</sup>:

$$\dot{\rho}_{de} = -3H(1+w)\rho_{de} + Q_{de},$$

$$\dot{\rho}_c = -3H\rho_c + Q_c, \quad (1)$$

式中  $\rho_{de}$  和  $\rho_c$  分别为暗能量和冷暗物质的能量密度. 这里  $Q = Q_{de} = -Q_c$ , 当  $Q=0$  时, 暗能量与暗物质之间不存在相互作用, 退回标准宇宙学模型; 当  $Q>0$  时, 暗物质向暗能量演化; 当  $Q<0$  时, 暗能量向暗物质演化. 由于暗能量和暗物质的未知性, 目前只能以假设来构造一些相对合理的唯象模型. 为了进一步做理论分析和数据验证, 了解相互作用暗能量模型的性质, 有必要对宇宙学扰动进行详细研究. 然而, 由于暗能量的压力扰动使用不当, 在早期阶段会发生大范围的不稳定性. 近年来, PPF 方法被用于计算相互作用暗能量情况下的微扰方程. 在此框架下, 暗能量压力扰动被暗能量动量密度与其他组分之间的关系所取代, 使不稳定性被避免. 结果表明, 该方法可以在一些模型下得到完整的参数空间<sup>[32]</sup>. 然而, 在一些特定的模型中, PPF 框架并不能完全解决不稳定性问题. 例如, 当  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_{de}$  时, 暗物质速度与非相互作用情况下的速度存在明显的偏差, 此时使用 PPF 方法,  $w$  接近  $-1$  时, 暗能量速度扰动会出现差异, 从而导致暗物质的扰动和物质功率谱发生发散<sup>[30]</sup>. 最近 Dai 等<sup>[30]</sup> 提出了一种新的模型来解决这一问题. 假设密度转移和动量转移与应力能张量分别为  $\delta T_0^0 = -\delta\rho$  和  $\delta T_0^i = -(\bar{\rho} + \bar{p})v^i$  有关, 而不是  $\delta\rho$  和  $v_i$ , 使  $w$  接近  $-1$  时没有差异. 同时, 因为不知道暗物质和暗能量的本质, 更不知道它们之间的相互作用形式, 所以只要是基于合理的假设, 在该种参数化方法下, 可以任意写出相互作用项

$$Q_{de} = -Q_c = C_1\rho_c + C_2\rho_{de},$$

$$\delta Q_{de} = -\delta Q_c = D_1\delta\rho_c + D_2\delta\rho_{de},$$

$$Q_{de}(v-B) + f_{de} = -Q_c(v-B) - f_c = E_1(\rho_c + p_c)(v_c - B) + E_2(\rho_{de} + p_{de})(v_{de} - B). \quad (2)$$

式中  $B$  为描述时空的扰动量,  $\delta\rho$  为密度扰动量,  $\delta Q$  为能量转移扰动,  $f$  为动量转移扰动,  $C$ 、 $D$ 、 $E$  为模型的自由参数.

在本研究中, 将采用该种参数化方法, 利用模拟的 Euclid 星系巡天数据在全参数空间下, 对以下 4 种情况下的相互作用暗能量模型进行限制:

1) 模型 1: 当  $C_1 = D_1 = E_1 = 3\beta H$ ,  $C_2 = D_2 = E_2 = 0$  时,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_c$ ;

2) 模型 2: 当  $C_1 = D_1 = E_1 = 3\beta H$ ,  $C_2 = D_2 = E_2 = 0$  时,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_{de}$ ;

3) 模型 3: 当  $C_2 = D_2 = E_2 = 3\beta H$ ,  $C_1 = D_1 = E_1 = 0$  时,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de} v_{de}$ ;

4) 模型 4: 当  $C_2 = D_2 = E_1 = 3\beta H$ ,  $C_1 = D_1 = E_2 = 0$  时,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de} v_c$ ,

式中  $\beta$  为耦合常数,  $H$  为哈勃参量,  $v_{de}$  和  $v_c$  分别为暗能量和暗物质的速度.

## 2 Euclid 星系巡天

Euclid 巡天将以高精度和高分辨率探测小尺度上的非线性结构增长. 目前对小尺度上复杂的物理过程并不是很了解, 从而导致了非线性小尺度上理论的不确定性. 本研究将采用 Sprenger 等<sup>[22]</sup> 提出的一种新的相对保守的方法来模拟非线性的理论误差. 建立理论不确定性误差模型的最简单方法是引入一个截止点, 这意味着可以忽略低于波数  $k_{NL}$  以下的所有理论不确定性. 当结果不是特别地依赖于不确定性从 0 上升到无穷大范围时, 该方法是一个很好的近似. 非线性效应随时间增加, 截止尺度应随红移而减小. 非线性效应的红移依赖性可以参数化为<sup>[33]</sup>

$$k_{NL}(z) = k_{NL}(0) \cdot (1+z)^{2/(2+n_s)}, \quad (3)$$

式中  $n_s$  为标量谱指数,  $z$  为红移. 在本章中, 根据 Sprenger 等的方法对 Euclid 星系巡天进行数据模拟和似然函数的计算, 因此只对关键部分做介绍, 细节可以参考文献 [22] 和 [34].

**2.1 星系团巡天** 星系团巡天主要包括了重子声学振荡和宇宙红移畸变. 重子声学振荡通过测量距离-红移来直接探测宇宙膨胀率. 具体而言, 在红移  $z$  处, 某一尺度的平行和垂直距离分别为

$$r_{\parallel} = \frac{c\Delta z}{H(z)}; \quad r_{\perp} = (1+z)D_A(z)\Delta\theta. \quad (4)$$

因此, 测出重子声学振荡对应的角度  $\theta$ , 则可计算出相应的角直径距离

$$D_A(z) = \frac{c}{1+z} \int_0^z \frac{dz}{H(z)}. \quad (5)$$

所以, 只要测出径向红移差, 便可以得到哈勃膨胀率  $H(z)$ .

除了观测红移, 星系本动速度会带来一个多普勒红移. 因此, 导致用观测红移计算距离时, 与宇宙学红移所对应的真实距离之间存在一定偏差, 从而导致了星系空间分布畸变. 其中, 在线性大尺度上, 这会让星系因受到挤压而使得成团性增强, 这也被称为 Kaiser 效应. Kaiser 效应对本动速度场的振幅  $f\sigma_8$  具有很强的依赖性. 由于红移畸变是探测宇宙结构的生长率  $f = d(\ln D)/d(\ln a)$ , 这表征了扰动增长快

慢,其中 $D$ 是线性增长因子, $a$ 是尺度因子,而 $\sigma_8$ 为 $8h^{-1}\text{Mpc}$ 半径范围内的物质成团强度.通常情况下, $f = \Omega_m^\gamma(z)$ ,在这里 $\Omega_m(z)$ 表征红移 $z$ 处的物质密度参数, $\gamma$ 为增长指数<sup>[35]</sup>.此外,在非线性的小尺度上,星系因为被拉伸从而使成团性进一步被减弱,该现象也就是通常所说的“上帝的手指”,因此在本研究中增加了指数因子来描述这种附加抑制作用.

星系团巡天主要测量了宇宙中大体积内的物质分布,从而得到星系的物质密度关联函数和功率谱,然后提取了重子声学振荡和红移畸变信号,分别可以测不同红移处的哈勃膨胀率和宇宙结构增长率.因此,在星系团巡天部分,主要模拟考虑了各种因素影响下的三维星系功率谱.

Euclid 星系团巡天将覆盖  $15000$  ( $^\circ$ )<sup>2</sup> ( $f_s = 0.3636$ ) 的天区以及探测  $30 \text{ arcmin}^{-2}$  的星系和星系团,红移范围为  $0.45 \sim 2.05$ ,使用的平均红移为  $z=0.5, 0.6, \dots, 2.0$ ,  $\Delta z=0.1$ . 光谱红移测量误差为  $\sigma_z = 0.001(1+z)$ ,在各红移区间内的星系数为

$$N(\bar{z}) = 41253 f_s (\text{^\circ})^2 \cdot \int_{\bar{z}-\Delta z/2}^{\bar{z}+\Delta z/2} \frac{dN(z)/dz}{1(z)^2} dz, \quad (6)$$

在各红移区间的天区大小

$$V_r(\bar{z}) = 4\pi f_s \cdot \int_{\Delta r(\bar{z})} r^2 dr = \frac{4\pi}{3} f_s \cdot \left[ r^3 \left( \bar{z} + \frac{\Delta z}{2} \right) - r^3 \left( \bar{z} - \frac{\Delta z}{2} \right) \right]. \quad (7)$$

结合式(6)和(7),可以得到 Euclid 星系团巡天的短噪声

$$P_N(\bar{z}) = \frac{V_r(\bar{z})}{N(\bar{z})}. \quad (8)$$

同时,参考文献[22],可以直接给出考虑了 Alcock-Paczynsky 效应( $f_A$ )、红移畸变( $f_R$ )等影响因素的观测星系功率谱

$$P_g(k, \mu, z) = f_A(z) \times f_i(k, \mu, z) \times f_R(\hat{k}, \hat{\mu}, z) \times b^2(z) \times P_m(\hat{k}, z), \quad (9)$$

这里 $P_m$ 为物质功率谱,最终可得到星系观测功率谱

$$P_o(k, \mu, \bar{z}) = P_g(k, \mu, \bar{z}) + P_N(\bar{z}). \quad (10)$$

在 Euclid 星系团巡天中设  $z=0$  时,非线性截止点为

$$k_{\text{NL}}(0) = 0.2h/\text{Mpc}.$$

似然函数则为

$$\chi^2 = \sum_{\bar{z}} \int_{k_{\text{min}}}^{k_{\text{max}}} dk \int_{-1}^{+1} d\mu k^2 \frac{V_r(\bar{z})}{2(2\pi)^2} \times \frac{\Delta P(k, \mu, \bar{z}_n)^2}{\sigma_{\text{obs}}^2(k, \mu, \bar{z}_n) + \sigma_{\text{th}}^2(k, \mu, \bar{z}_n)}, \quad (11)$$

式中 $\Delta P$ 为基准和模拟功率谱之差,观测误差为 $\sigma_o(k, \mu, \bar{z}_n) = G_g(k, \mu, \bar{z}_n) + P_N$ ,理论误差为

$$\sigma(k, \mu, z) = \left[ \frac{V_r(z)}{2(2\pi)^2} k^2 \Delta k \frac{\Delta z}{\Delta \bar{z}} \right]^{1/2} \alpha(k, \mu, z) P_g(k, \mu, z), \quad (12)$$

式中 $\alpha(k, \mu, z)$ 为相对误差的 $1\sigma$ 包络函数.因为理论不确定性误差随着 $k$ 增大而增大, $0.33\%$  ( $k = 0.01h/\text{Mpc}$ )、 $1\%$  ( $k = 0.3h/\text{Mpc}$ )、 $10\%$  ( $k = 0.10h/\text{Mpc}$ ),所以 $\alpha(k, \mu, z)$ 可以为

$$\alpha(k, \mu, z) = \begin{cases} 1.4806\% \exp\left(0.75056 \cdot \lg \frac{k}{k_1(z)}\right), & \frac{k}{k_1(z)} < 0.3, \\ 2.2047\% \exp\left(1.5120 \cdot \lg \frac{k}{k_1(z)}\right), & \frac{k}{k_1(z)} > 0.3, \end{cases} \quad (13)$$

式中 $k_1(z) = \frac{1h}{\text{Mpc}} \cdot (1+z)^{2/(2+n_s)}$ .

**2.2 宇宙剪切巡天** 宇宙剪切是指沿着观测者视线方向来观测由宇宙大尺度结构对高红移星系所产生的弱引力透镜现象,因此宇宙剪切巡天通过弱引力透镜效应来直接探测宇宙空间物质分布.可以通过观测星系形状随其位置的变化,然后计算分析,得到弱引力透镜信号的2点相关函数

$$\xi_{\pm}(\theta) = \langle \gamma_i(x_i) \gamma_j(x_j) \rangle \pm \langle \gamma_r(x_i) \gamma_r(x_j) \rangle, \quad (14)$$

在这里, $\theta = |x_i - x_j|$ 是2个星系间的角距离, $\gamma_i$ 和 $\gamma_r$ 分别是2个星系连线切向和该连线转动 $45^\circ$ 方向上的剪切.因为星系的形变统计星系反映了大尺度结构的统计星系,因此进一步通过透镜层析方法得到物质的三维分布,这样也就能了解宇宙结构演化历史<sup>[36]</sup>.宇宙剪切巡天从物质分布得到物质功率谱,不需要太多的假设和经验公式,观测信号与物质功率谱直接相关,因此利用其来研究暗能量性质是关键方法之一.

对于宇宙剪切巡天,能从三维的物质功率谱中得到在 $\ell$ 极处红移区间的剪切功率谱

$$C_\ell^{ij} = \frac{9}{16} \Omega_m^2 H_0^4 \int_0^\infty \frac{r}{r^2} g_i(r) g_j(r) P\left(k = \frac{\ell}{r}, z(r)\right), \quad (15)$$

式中函数 $g_i(r)$ 依赖于在红移区间 $i$ 处的径向星系数目,可以表达为

$$g_i(r) = 2r(1+z(r)) \int_r^\infty r' \frac{\eta_i(r')(r'-r)}{r'} dr', \quad (16)$$

$$\eta_i(r) = H(r)n_i(z(r)), \quad (17)$$

$$n_i(z) = \frac{D_i(z)}{\int_0^\infty D_i(z')z'}, \quad (18)$$

$$D_i(z) = \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} \mathcal{P}(z, z') \frac{n_g(z')}{z} z'. \quad (19)$$

由于星系内在的排列, 所以也有一个噪声  $N_\ell$ , 可以写为

$$N_\ell^{ij} = \delta_{ij} 0.3^2 \left[ \frac{N_g}{10} \times 3 \ 600 \left( \frac{180}{\pi} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (20)$$

由式(15)和(20)可得观测功率谱

$$P_o = C_\ell^{ij} + N_\ell^{ij}. \quad (21)$$

在 Euclid 宇宙剪切巡天中, 设非线性截点  $l_{\max}^i = k_{\text{NL}}(z) \cdot \bar{r}_p^i$ ,  $k_{\text{NL}}(0) = 0.5h/\text{Mpc}$ ,  $l_{\min} = 5$ , 似然函数可以表达为

$$2 \ln \mathcal{L} = \sum_\ell \Delta \chi_\ell^2(\Delta P), \quad (22)$$

式中  $\Delta P$  为基准和样本功率谱之差, 具体为  $\Delta P = P_o - P_f = 0.001 P_o$ .

### 3 对相互作用暗能量模型的限制结果

本研究主要讨论最基本的暗能量模型, 即状态方程参数  $w$  为常数的  $w\text{CDM}$  模型, 其中在中微子总质量  $\sum m_\nu = 0.06 \text{ eV}$  情况下, 选取了 6 个宇宙学基本参数以及  $w$  和  $\beta$  作为研究的参数空间。

$$\{\Omega_b h^2, \Omega_c h^2, 100 \times \theta_s, 100 \theta_s, \tau_r, n_s, A_s, \beta, w\}, \quad (23)$$

式中  $\Omega_b h^2$  和  $\Omega_c h^2$  分别是重子物质和冷暗物质的物质

密度,  $\theta_s$  是退耦时期声学视界的角直径距离,  $\tau_r$  是再电离光深,  $n_s$  是标量谱指数,  $A_s$  是原初功率谱的幅度。使用的基准模型为

$$\{0.022 \ 1, 0.112, 1.041, 0.085 \ 3, 0.075 \ 3, 0.936, 0-1\}. \quad (24)$$

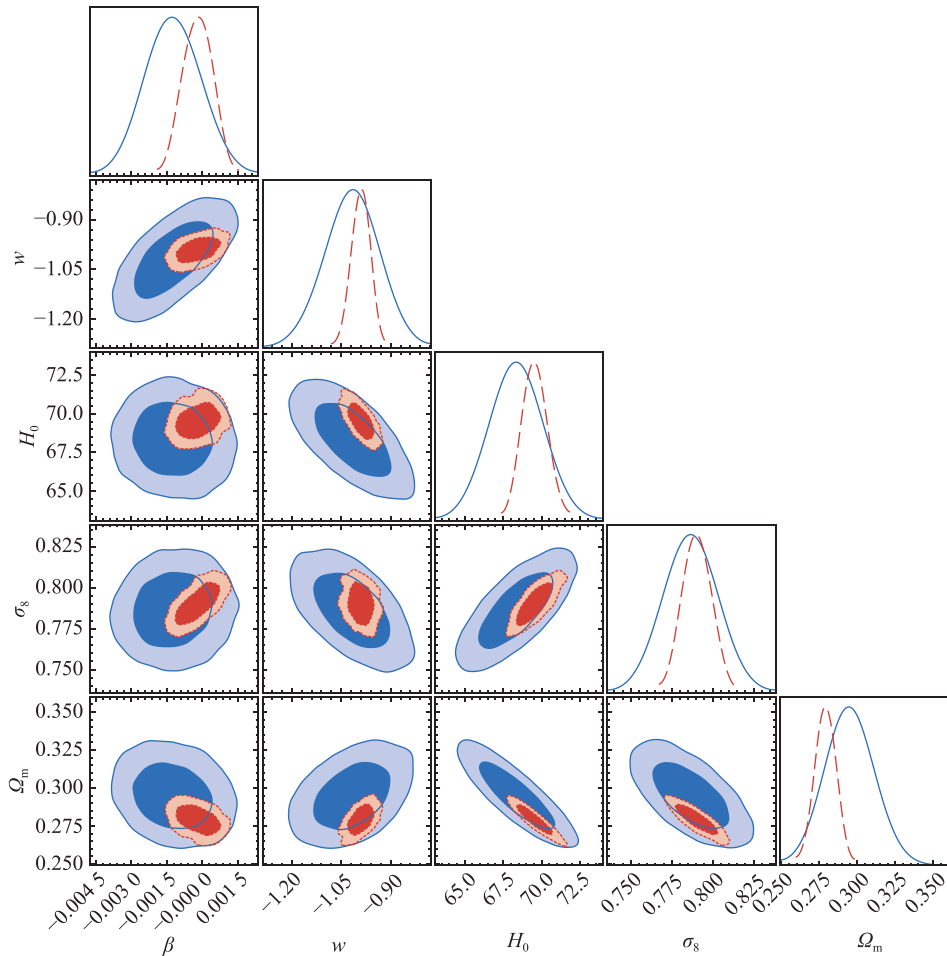
在本研究中, 为了计算方便, 使用了以基准模型模拟的温度、极化宇宙微波背景辐射数据 (CMB) 进行预测, 其中噪声光谱与最终 Planck 数据发布的预期灵敏度是相匹配的<sup>[37]</sup>。研究所使用的重子声学振荡数据 (BAO) 为 6dFGS<sup>[38]</sup>、BOSS DR9<sup>[39]</sup>、SDSS DR7<sup>[40]</sup>、Ia 型超新星数据 (SNe Ia) 为 Union 2<sup>[41]</sup>。结合模拟的 Euclid 星系团巡天和宇宙剪切巡天数据<sup>[22]</sup>, 使用 MONTEPYTHON 的 MCMC 方法在全参数空间下预测限制相互作用暗能量模型<sup>[42]</sup>。

**3.1 模型 1** [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c.v.c}}$ ] 表 1 分别列出了 CMB+BAO+SNe 和 Euclid+CMB+BAO+SNe 数据组合对模型  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c.v.c}}$  拟合得到各个参数的拟合最佳值、 $1\sigma$  和  $2\sigma$  误差; 图 1 显示了  $\beta$ 、 $w$ 、 $H$ 、 $\Omega_m$ 、 $\sigma_8$  的一维分布曲线 (68% 置信度) 以及二维 (95% 置信度) 的参数空间, 红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。从限制结果来看, 加入 Euclid 模拟数据会使模型参数得到更好的限制, 误差水平平均降低了 34.93%。值得注意的是, 用 CMB+BAO+SNe 数据组合限制  $\beta$  时, 在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.001 \ 24_{-0.001 \ 02}^{+0.001 \ 08}$ , 在  $1.24\sigma$  置信区间不为 0, 但加入 Euclid 模拟数据后,  $\beta$  在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.000 \ 17_{-0.000 \ 61}^{+0.000 \ 58}$ , 仅仅在  $0.29\sigma$  置信区间不为 0。

**3.2 模型 2** [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c.v.de}}$ ] 表 2 分别列出了 CMB+BAO+SNe Ia 和 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合对模型  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c.v.de}}$  拟合得到的各个参数的拟合最佳值、 $1\sigma$  和  $2\sigma$  误差; 图 2 显示了  $\beta$ 、 $w$ 、 $H$ 、 $\Omega_m$ 、 $\sigma_8$  的一

表 1 模型 1 [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c.v.c}}$ ] 拟合得到的最佳值、 $1\sigma$  误差 (68% 置信度)、 $2\sigma$  误差 (95% 置信度)

参数	Planck+BAO+SNe Ia	Planck+BAO+SNe Ia+Euclid
$\Omega_b h^2$	$0.022 \ 17_{-0.000 \ 19}^{+0.000 \ 19} (1\sigma)_{-0.000 \ 37}^{+0.000 \ 38} (2\sigma)$	$0.022 \ 12_{-0.000 \ 15}^{+0.000 \ 14} (1\sigma)_{-0.000 \ 29}^{+0.000 \ 31} (2\sigma)$
$\Omega_c h^2$	$0.114 \ 87_{-0.002 \ 08}^{+0.001 \ 99} (1\sigma)_{-0.004 \ 25}^{+0.003 \ 96} (2\sigma)$	$0.112 \ 15_{-0.000 \ 58}^{+0.000 \ 60} (1\sigma)_{-0.001 \ 14}^{+0.001 \ 12} (2\sigma)$
$\theta_s$	$1.041 \ 75_{-0.000 \ 35}^{+0.000 \ 35} (1\sigma)_{-0.000 \ 70}^{+0.000 \ 67} (2\sigma)$	$1.041 \ 83_{-0.000 \ 37}^{+0.000 \ 33} (1\sigma)_{-0.000 \ 72}^{+0.000 \ 69} (2\sigma)$
$\ln 10^{10} A_s$	$3.072 \ 1_{-0.010 \ 65}^{+0.011 \ 29} (1\sigma)_{-0.020 \ 42}^{+0.022 \ 04} (2\sigma)$	$3.074 \ 38_{-0.009 \ 37}^{+0.010 \ 12} (1\sigma)_{-0.019 \ 77}^{+0.019 \ 92} (2\sigma)$
$\tau_r$	$0.960 \ 47_{-0.003 \ 80}^{+0.003 \ 70} (1\sigma)_{-0.007 \ 59}^{+0.007 \ 43} (2\sigma)$	$0.963 \ 34_{-0.002 \ 96}^{+0.003 \ 12} (1\sigma)_{-0.005 \ 91}^{+0.005 \ 99} (2\sigma)$
$n_s$	$0.084 \ 05_{-0.005 \ 12}^{+0.005 \ 47} (1\sigma)_{-0.009 \ 76}^{+0.010 \ 80} (2\sigma)$	$0.084 \ 87_{-0.004 \ 85}^{+0.005 \ 44} (1\sigma)_{-0.010 \ 69}^{+0.010 \ 69} (2\sigma)$
$\beta$	$-0.001 \ 24_{-0.001 \ 02}^{+0.001 \ 08} (1\sigma)_{-0.001 \ 96}^{+0.002 \ 15} (2\sigma)$	$-0.000 \ 17_{-0.000 \ 61}^{+0.000 \ 58} (1\sigma)_{-0.001 \ 08}^{+0.001 \ 06} (2\sigma)$
$w$	$-1.015 \ 97_{-0.074 \ 10}^{+0.071 \ 02} (1\sigma)_{-0.152 \ 24}^{+0.141 \ 00} (2\sigma)$	$-0.989 \ 67_{-0.026 \ 85}^{+0.024 \ 06} (1\sigma)_{-0.054 \ 49}^{+0.048 \ 77} (2\sigma)$
$H_0$	$68.342 \ 31_{-1.514 \ 47}^{+1.535 \ 82} (1\sigma)_{-2.975 \ 07}^{+3.057 \ 09} (2\sigma)$	$69.532 \ 12_{-0.735 \ 71}^{+0.777 \ 57} (1\sigma)_{-1.379 \ 34}^{+1.611 \ 74} (2\sigma)$
$\sigma_8$	$0.786 \ 69_{-0.014 \ 69}^{+0.014 \ 47} (1\sigma)_{-0.028 \ 82}^{+0.028 \ 78} (2\sigma)$	$0.790 \ 12_{-0.007 \ 80}^{+0.008 \ 47} (1\sigma)_{-0.014 \ 79}^{+0.015 \ 70} (2\sigma)$
$\Omega_m$	$0.294 \ 63_{-0.013 \ 23}^{+0.014 \ 01} (1\sigma)_{-0.026 \ 14}^{+0.028 \ 26} (2\sigma)$	$0.279 \ 00_{-0.006 \ 22}^{+0.006 \ 40} (1\sigma)_{-0.013 \ 03}^{+0.012 \ 20} (2\sigma)$



红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合，蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。

图 1 模型 1[ $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_c$ ] 的限制结果在  $1\sigma$  和  $2\sigma$  置信区间的一维、二维等高图

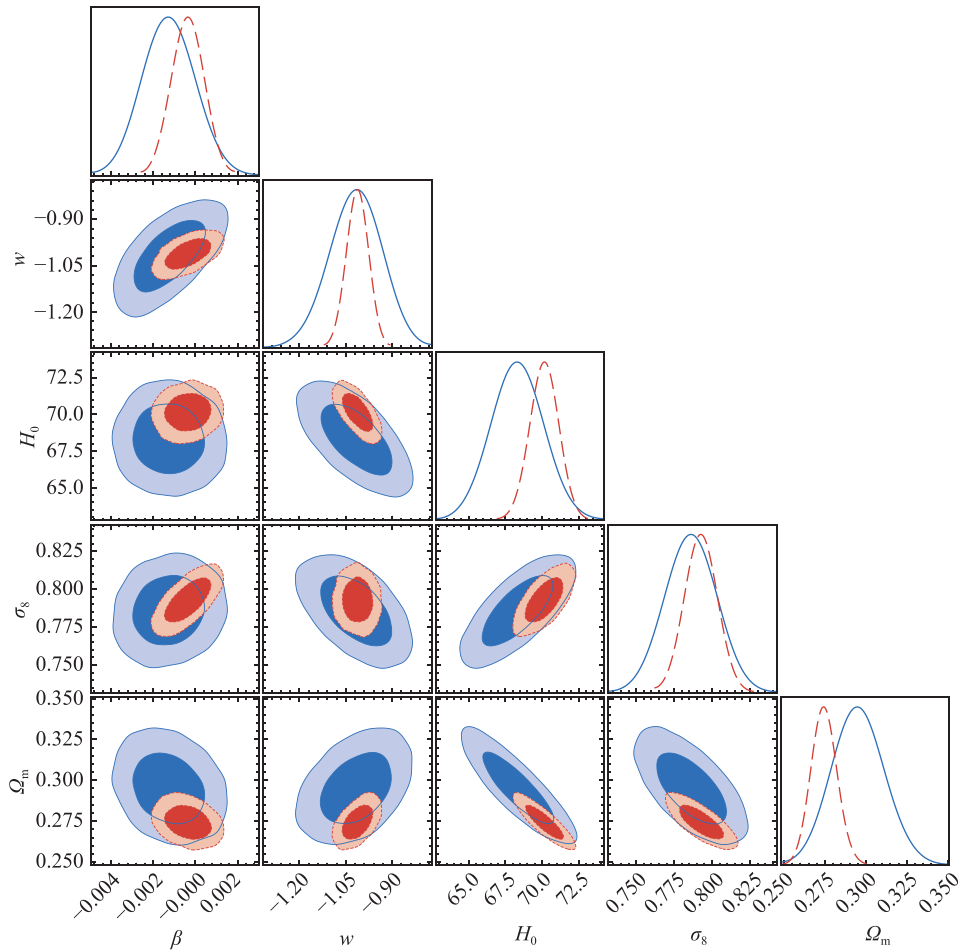
表 2 模型 2[ $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_{de}$ ] 拟合得到的最佳值、 $1\sigma$  误差 (68% 置信度)、 $2\sigma$  误差 (95% 置信度)

参数	Planck+BAO+SNe	Planck+BAO+SNe+Euclid
$\Omega_b h^2$	$0.02217^{+0.00019}_{-0.00019}(1\sigma)^{+0.00038}_{-0.00037}(2\sigma)$	$0.0221749^{+0.00017}_{-0.00017}(1\sigma)^{+0.00034}_{-0.00033}(2\sigma)$
$\Omega_c h^2$	$0.11492^{+0.00201}_{-0.00211}(1\sigma)^{+0.00407}_{-0.00407}(2\sigma)$	$0.11221^{+0.00062}_{-0.00064}(1\sigma)^{+0.00125}_{-0.00129}(2\sigma)$
$\theta_s$	$1.04178^{+0.00035}_{-0.00035}(1\sigma)^{+0.00069}_{-0.00070}(2\sigma)$	$1.04183^{+0.00035}_{-0.00035}(1\sigma)^{+0.00068}_{-0.00070}(2\sigma)$
$\ln 10^{10} A_s$	$3.07205^{+0.01098}_{-0.01028}(1\sigma)^{+0.02185}_{-0.01943}(2\sigma)$	$3.07388^{+0.01084}_{-0.01012}(1\sigma)^{+0.02232}_{-0.01970}(2\sigma)$
$\tau_r$	$0.96059^{+0.00379}_{-0.00384}(1\sigma)^{+0.00738}_{-0.00753}(2\sigma)$	$0.96342^{+0.00325}_{-0.00311}(1\sigma)^{+0.00629}_{-0.00617}(2\sigma)$
$n_s$	$0.08407^{+0.00533}_{-0.00499}(1\sigma)^{+0.01076}_{-0.00939}(2\sigma)$	$0.08521^{+0.00536}_{-0.00492}(1\sigma)^{+0.01095}_{-0.00970}(2\sigma)$
$\beta$	$-0.00127^{+0.00108}_{-0.00106}(1\sigma)^{+0.00216}_{-0.00203}(2\sigma)$	$-0.00036^{+0.00069}_{-0.0007}(1\sigma)^{+0.00133}_{-0.00133}(2\sigma)$
$w$	$-1.01594^{+0.07092}_{-0.07448}(1\sigma)^{+0.13731}_{-0.15297}(2\sigma)$	$-1.01213^{+0.03111}_{-0.03139}(1\sigma)^{+0.06174}_{-0.06343}(2\sigma)$
$H_0$	$68.31663^{+1.53528}_{-1.50891}(1\sigma)^{+3.09565}_{-2.96989}(2\sigma)$	$70.15377^{+0.80404}_{-0.82193}(1\sigma)^{+1.61480}_{-1.66906}(2\sigma)$
$\sigma_8$	$0.78596^{+0.01444}_{-0.01455}(1\sigma)^{+0.02854}_{-0.02844}(2\sigma)$	$0.79260^{+0.00934}_{-0.00925}(1\sigma)^{+0.01864}_{-0.01838}(2\sigma)$
$\Omega_m$	$0.29518^{+0.01387}_{-0.01352}(1\sigma)^{+0.02869}_{-0.02625}(2\sigma)$	$0.27429^{+0.00658}_{-0.00637}(1\sigma)^{+0.01395}_{-0.01256}(2\sigma)$

维分布曲线 (68% 置信度) 以及二维 (95% 置信度) 的参数空间, 红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合. 从限制结果来看, 加入 Euclid 模拟数据会使模型参数得到更好的限制, 误差水平平均降低了 29.81%. 值得注意

的是, 用 CMB+BAO+SNe 数据组合限制  $\beta$  时, 在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00127^{+0.00108}_{-0.00106}$ , 在  $1.19\sigma$  置信区间不为 0, 但加入 Euclid 模拟数据后,  $\beta$  在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00036^{+0.00069}_{-0.0007}$ , 仅仅在  $0.52\sigma$  置信区间不为 0.

3.3 模型 3[ $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c v_{de}$ ] 表 3 分别列出了 CMB+



红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。

图 2 模型 2 [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{de}}$ ] 的限制结果在  $1\sigma$  和  $2\sigma$  置信区间的一维、二维等高图

BAO+SNe Ia 和 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合对模型  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{de}}$  拟合得到的各个参数的拟合最佳值、 $1\sigma$  和  $2\sigma$  误差; 图 3 显示了  $\beta$ 、 $w$ 、 $H$ 、 $\Omega_{\text{m}}$ 、 $\sigma_8$  的一维分布曲线 (68% 置信度) 以及二维 (95% 置信度) 的参数空间, 红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。从限制结果来看, 加入 Euclid 模拟数据没有使得模型参数得到进一步的限制。值得注意的是, 用 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合限制  $\beta$  时,  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00386_{-0.00319}^{+0.00237}$ ,  $1.22\sigma$  置信区间不为 0, 但加入 Euclid 模拟数据后,  $\beta$  在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00185_{-0.00540}^{+0.00512}$ , 仅仅在  $0.35\sigma$  置信区间不为 0。

**3.4 模型 4 [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{c}}$ ]** 表 4 分别列出了 CMB+BAO+SNe Ia 和 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合对模型  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{c}}\nu_{\text{c}}$  拟合得到的各个参数的拟合最佳值、 $1\sigma$  和  $2\sigma$  误差; 图 4 显示了  $\beta$ 、 $w$ 、 $H$ 、 $\Omega_{\text{m}}$ 、 $\sigma_8$  的一维分布曲线 (68% 置信度) 以及二维 (95% 置信度) 的参数空间, 红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。从限制

结果来看, 加入 Euclid 模拟数据会使模型参数得到更好的限制, 误差水平平均降低 40%。值得注意的是, 用 CMB+BAO+SNe 数据组合限制  $\beta$  时,  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00275_{-0.00221}^{+0.00217}$ ,  $1.23\sigma$  置信区间不为 0, 但加入 Euclid 模拟数据后,  $\beta$  在  $1\sigma$  置信区间的误差为  $-0.00031_{-0.00159}^{+0.00125}$ , 仅仅在  $0.94\sigma$  置信区间不为 0。

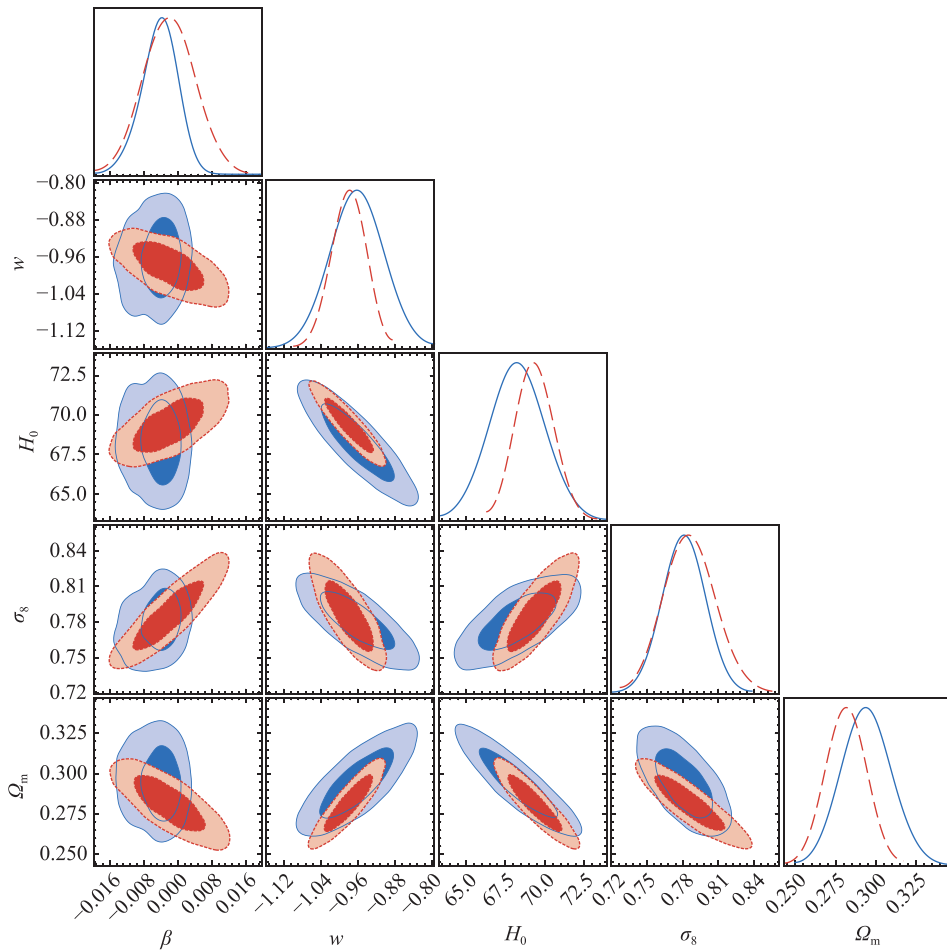
## 4 总结

由于物理过程的复杂性 (如非线性和重子反馈) 引起的非线性尺度上的理论不确定性, 本文考虑到这些不确定性, 并采用了 Sprenger 等<sup>[22]</sup>提出的一种方法, 模拟了 Euclid 巡天实验的非线性理论不确定性误差。本文基于模拟的 Euclid 的星系红移巡天和宇宙剪切巡天数据, 同时结合宇宙微波背景辐射、宇宙声学振荡和 Ia 型超新星, 利用 MONTEPYTHON 中的 MCMC 算法, 对  $w$ CDM 模型进行预测限制。

近年来, 由于参数化后弗里德曼方法的提出, 使得大尺度的发散问题得到避免, 从而可以探索一些相互作用暗能量模型的完整的参数空间。但在一些

表 3 模型 3 [ $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_{de}$ ] 拟合得到的最佳值、 $1\sigma$  误差 (68% 置信度)、 $2\sigma$  误差 (95% 置信度)

参数	Planck+BAO+SNe	Planck+BAO+SNe+Euclid
$\Omega_b h^2$	$0.022\ 04^{+0.000\ 16}_{-0.000\ 15}(1\sigma)^{+0.000\ 31}_{-0.000\ 31}(2\sigma)$	$0.022\ 10^{+0.000\ 14}_{-0.000\ 13}(1\sigma)^{+0.000\ 28}_{-0.000\ 26}(2\sigma)$
$\Omega_c h^2$	$0.114\ 23^{+0.001\ 57}_{-0.001\ 46}(1\sigma)^{+0.003\ 51}_{-0.003\ 56}(2\sigma)$	$0.112\ 51^{+0.001\ 53}_{-0.001\ 45}(1\sigma)^{+0.003\ 06}_{-0.003\ 17}(2\sigma)$
$\theta_s$	$1.041\ 70^{+0.000\ 34}_{-0.000\ 32}(1\sigma)^{+0.000\ 65}_{-0.000\ 64}(2\sigma)$	$1.041\ 77^{+0.000\ 34}_{-0.000\ 33}(1\sigma)^{+0.000\ 68}_{-0.000\ 66}(2\sigma)$
$\ln 10^{10} A_s$	$3.076\ 36^{+0.009\ 64}_{-0.008\ 97}(1\sigma)^{+0.020\ 25}_{-0.017\ 68}(2\sigma)$	$3.074\ 43^{+0.010\ 08}_{-0.009\ 09}(1\sigma)^{+0.020\ 93}_{-0.017\ 53}(2\sigma)$
$\tau_r$	$0.961\ 22^{+0.003\ 53}_{-0.003\ 68}(1\sigma)^{+0.007\ 50}_{-0.007\ 16}(2\sigma)$	$0.963\ 27^{+0.003\ 23}_{-0.003\ 16}(1\sigma)^{+0.006\ 84}_{-0.006\ 30}(2\sigma)$
$n_s$	$0.084\ 52^{+0.005\ 21}_{-0.004\ 73}(1\sigma)^{+0.011\ 09}_{-0.009\ 11}(2\sigma)$	$0.084\ 76^{+0.005\ 50}_{-0.004\ 88}(1\sigma)^{+0.011\ 02}_{-0.009\ 40}(2\sigma)$
$\beta$	$-0.003\ 86^{+0.002\ 37}_{-0.003\ 19}(1\sigma)^{+0.004\ 69}_{-0.007\ 97}(2\sigma)$	$-0.001\ 85^{+0.005\ 12}_{-0.005\ 40}(1\sigma)^{+0.011\ 15}_{-0.011\ 09}(2\sigma)$
$w$	$-0.961\ 62^{+0.049\ 96}_{-0.049\ 52}(1\sigma)^{+0.100\ 20}_{-0.099\ 77}(2\sigma)$	$-0.979\ 11^{+0.032\ 48}_{-0.034\ 72}(1\sigma)^{+0.059\ 45}_{-0.067\ 8}(2\sigma)$
$H_0$	$68.240\ 93^{+1.564\ 47}_{-1.492\ 74}(1\sigma)^{+3.088\ 93}_{-3.012\ 22}(2\sigma)$	$69.335\ 44^{+1.129\ 37}_{-1.030\ 36}(1\sigma)^{+2.260\ 36}_{-1.926\ 19}(2\sigma)$
$\sigma_8$	$0.781\ 10^{+0.014\ 96}_{-0.015\ 44}(1\sigma)^{+0.030\ 19}_{-0.030\ 87}(2\sigma)$	$0.785\ 57^{+0.018\ 79}_{-0.017\ 87}(1\sigma)^{+0.041\ 06}_{-0.034\ 82}(2\sigma)$
$\Omega_m$	$0.294\ 01^{+0.013\ 56}_{-0.013\ 09}(1\sigma)^{+0.027\ 87}_{-0.024\ 85}(2\sigma)$	$0.281\ 41^{+0.010\ 88}_{-0.011\ 10}(1\sigma)^{+0.021\ 45}_{-0.021\ 81}(2\sigma)$



红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合.

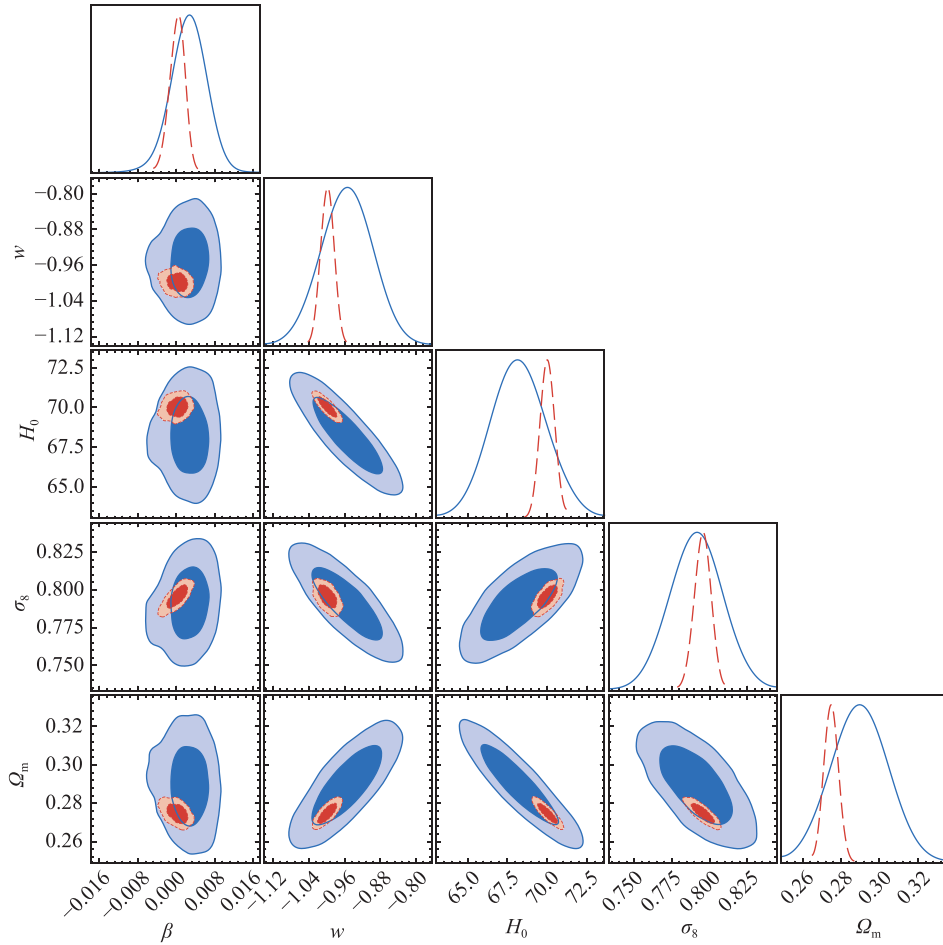
图 3 模型 3 [ $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_{de}$ ] 的限制结果在  $1\sigma$  和  $2\sigma$  置信区间的一维、二维等高图

特定的模型中, PPF 框架并不能完全解决不稳定性问题, 如当  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_{de}$  时, 会出现暗物质扰动和物质功率谱发生发散. Dai 等人<sup>[30]</sup> 提出了一种新的参数化方法, 已经成功解决了这一问题. 因为该参数化方法具有的一般性, 所以只要是基于合理的假设,

在该种参数化方法下, 可以探索任意相互作用暗能量模型的全参数空间. 本文采用了该种参数化方法, 对 4 个相互作用暗能量模型  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_c$ 、 $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_{de}$ 、 $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c \nu_{de}$  进行了限制. 根据计算结果, 可以得到以下结论:

表 4 模型 4 [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_c$ ] 拟合得到的最佳值、 $1\sigma$  误差 (68% 置信度)、 $2\sigma$  误差 (95% 置信度)

参数	Planck+BAO+SNe	Planck+BAO+SNe+Euclid
$\Omega_b h^2$	$0.020\ 25^{+0.000\ 16}_{-0.000\ 16}(1\sigma)_{-0.000\ 31}^{+0.030\ 00}(2\sigma)$	$0.022\ 14^{+0.000\ 14}_{-0.000\ 14}(1\sigma)_{-0.000\ 29}^{+0.000\ 28}(2\sigma)$
$\Omega_c h^2$	$0.111\ 96^{+0.001\ 47}_{-0.001\ 42}(1\sigma)_{-0.002\ 84}^{+0.003\ 25}(2\sigma)$	$0.113\ 03^{+0.000\ 77}_{-0.001\ 02}(1\sigma)_{-0.002\ 02}^{+0.001\ 53}(2\sigma)$
$\theta_s$	$1.041\ 74^{+0.000\ 35}_{-0.000\ 34}(1\sigma)_{-0.000\ 64}^{+0.000\ 69}(2\sigma)$	$1.041\ 77^{+0.000\ 35}_{-0.000\ 33}(1\sigma)_{-0.000\ 66}^{+0.000\ 69}(2\sigma)$
$\ln 10^{10} A_s$	$3.077\ 37^{+0.009\ 76}_{-0.009\ 18}(1\sigma)_{-0.017\ 50}^{+0.020\ 53}(2\sigma)$	$3.074\ 36^{+0.008\ 72}_{-0.008\ 28}(1\sigma)_{-0.016\ 31}^{+0.017\ 10}(2\sigma)$
$\tau_r$	$0.961\ 34^{+0.003\ 60}_{-0.003\ 62}(1\sigma)_{-0.007\ 05}^{+0.007\ 06}(2\sigma)$	$0.962\ 23^{+0.003\ 04}_{-0.003\ 15}(1\sigma)_{-0.006\ 50}^{+0.005\ 88}(2\sigma)$
$n_s$	$0.084\ 97^{+0.005\ 13}_{-0.004\ 75}(1\sigma)_{-0.009\ 24}^{+0.011\ 06}(2\sigma)$	$0.084\ 78^{+0.005\ 08}_{-0.004\ 97}(1\sigma)_{-0.009\ 41}^{+0.010\ 07}(2\sigma)$
$\beta$	$0.002\ 75^{+0.002\ 17}_{-0.002\ 21}(1\sigma)_{-0.007\ 18}^{+0.003\ 81}(2\sigma)$	$-0.000\ 47^{+0.000\ 51}_{-0.000\ 40}(1\sigma)_{-0.000\ 78}^{+0.001\ 10}(2\sigma)$
$w$	$-0.954\ 32^{+0.048\ 25}_{-0.049\ 68}(1\sigma)_{-0.100\ 01}^{+0.095\ 99}(2\sigma)$	$-1.021\ 30^{+0.022\ 41}_{-0.018\ 06}(1\sigma)_{-0.034\ 86}^{+0.043\ 52}(2\sigma)$
$H_0$	$68.188\ 82^{+1.571\ 77}_{-1.464\ 99}(1\sigma)_{-2.880\ 58}^{+3.148\ 11}(2\sigma)$	$69.986\ 67^{+0.291\ 51}_{-0.301\ 31}(1\sigma)_{-0.565\ 16}^{+0.588\ 38}(2\sigma)$
$\sigma_8$	$0.791\ 70^{+0.014\ 68}_{-0.015\ 71}(1\sigma)_{-0.030\ 16}^{+0.030\ 61}(2\sigma)$	$0.795\ 50^{+0.004\ 80}_{-0.005\ 07}(1\sigma)_{-0.010\ 14}^{+0.009\ 60}(2\sigma)$
$\Omega_m$	$0.289\ 63^{+0.013\ 08}_{-0.013\ 09}(1\sigma)_{-0.025\ 63}^{+0.026\ 01}(2\sigma)$	$0.277\ 24^{+0.003\ 11}_{-0.003\ 41}(1\sigma)_{-0.006\ 98}^{+0.006\ 14}(2\sigma)$



红色为 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合, 蓝色为 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合。

图 4 模型 4 [ $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_c$ ] 的限制结果在  $1\sigma$  和  $2\sigma$  置信区间的一维、二维等高图

1)除了  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_c$  模型, 其他模型在加入 Euclid 模拟数据后, 模型参数均得到了更好的限制. 特别地, 在  $Q_{\text{de}} \propto 3\beta H\rho_{\text{de}}\nu_c$  模型中, 加入 Euclid 模拟数据使模型参数误差水平平均降低了 40%. 这主要是因为 Euclid 巡天通过重子声学振荡、宇宙红移畸变和弱

引力透镜探针能对宇宙膨胀率、宇宙结构增长率、物质功率谱进行很好地测定.

2)在各模型中, 用 CMB+BAO+SNe 数据组合限制时并未显示出  $\beta$  与  $\Omega_m$ 、 $H_0$  具有明显的相关性, 但在加入 Euclid 后,  $\beta$  显示出与  $\Omega_m$ 、 $H_0$  具有相关性, 因此

在未来使用 Euclid 巡天数据研究暗能量性质时, 可以加入哈勃参数的直接测量等数据, 来减弱  $\beta$  与  $\Omega_m$ 、 $H_0$  的简并性, 从而更好地限制  $\beta$ ; 与此同时, 可以看出在各个模型中,  $\beta$  与  $\sigma_8$  均存在很强的相关性, 因此对  $\sigma_8$  更好地测量也能进一步限制  $\beta$ .

3) 在各个模型中, 用 CMB+BAO+SNe Ia 数据组合限制时,  $\beta$  均在  $1.2\sigma$  置信区间内不为 0; 当用 Euclid+CMB+BAO+SNe Ia 数据组合限制时, 除了  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de}v_c$  模型, 其他 3 个模型  $\beta$  均在  $1\sigma$  置信区间内不为 0, 而在  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de}v_c$  模型中,  $\beta$  在  $1.9\sigma$  置信区间内不为 0.

## 5 参考文献

- [1] ADE P A R, AGHANIM N, ARNAUD M, et al. Planck 2015 results: XIII: cosmological parameters[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, 594: A13
- [2] AMENDOLA L. Coupled quintessence[J]. *Physical Review D*, 2000, 62(4): 043511
- [3] WANG S, ZHANG Y. Alleviation of cosmic age problem in interacting dark energy model[J]. *Physics Letters B*, 2008, 669: 201
- [4] CALDWELL R R, DAVE R, STEINHARDT P J. Cosmological imprint of an energy component with general equation of state[J]. *Physics Review Letters*, 1998, 80: 1582
- [5] LIDDLE A R, SCHERRER R J. Classification of scalar field potentials with cosmological scaling solutions[J]. *Physical Review D*, 1998, 59: 023509 7
- [6] CALDWELL R R. A phantom menace? Cosmological consequences of a dark energy component with super-negative equation of state[J]. *Physics Letters B*, 2002, 545: 23
- [7] CARROLL S M, HOFFMAN M, TRODDEN M. Can the dark energy equation-of-state parameter  $w$  be less than 1[J]. *Physical Review D*, 2003, 68: 023509
- [8] HE J H, WANG B, ABDALLA E. Stability of the curvature perturbation in dark sector' mutual interacting models[J]. *Physics Letters B*, 2009, 671: 139
- [9] 郭娟娟, 宋佳霖, 李思哲, 等. 相互作用暗能量模型的研究现状[J]. *天文与天体物理*, 2017, 5(3): 21
- [10] CAO S, LIANG N. Interaction between dark energy and dark matter: observational constraints from OHD, BAO, CMB and SNe Ia[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2013, 22(14): 1350082
- [11] COSTA A A, MARCONDES R J F, LANDIM R G, et al. J-PAS: forecasts on interacting dark energy from baryon acoustic oscillations and redshift-space distortions[J]. *MNRAS*, 2019, 488: 78
- [12] MAARTENS R, ABDALLAET F B, JARVIS M, et al. Overview of cosmology with the SKA[J]. *Proceedings of Science*, 2015, AASKA14: 016
- [13] AMENDOLA L, APPLEBY, BACON D, et al. Cosmology and fundamental physics with the Euclid satellite[J]. *Living Rev Rel*, 2013, 16: 6
- [14] GONG Y, LIU X K, CAO Y, et al. Cosmology from the Chinese space station optical survey (CSS-OS) [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 883: 2
- [15] 杨晓峰. 引力透镜和弱引力透镜的新方法[J]. *天文学进展*, 2011, 29(4)
- [16] HILBERT S, XU D D, SCHNEIDER P, et al. Intrinsic alignments of galaxies in the illustris simulation[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2017, 468(1): 790
- [17] MARCEL P VAN DAALEN, JOOP SCHAYE C M. Booth, and claudio dalla vecchia the effects of galaxy formation on the matter power spectrum: a challenge for precision cosmology[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 415: 3649
- [18] AUREL S, ROMAIN T. A new method to quantify the effects of baryons on the matter power spectrum[J]. *JCAP*, 2015, 1512(12): 049
- [19] DEBONO I, RASSAT A, REFREGIER A, et al. Weak lensing forecasts for dark energy, neutrinos and initial conditions[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 404: 110
- [20] WANG Y, PERCIVAL W, CIMATTI A, et al. Designing a space-based galaxy redshift survey to probe dark energy[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2010, 409: 737
- [21] CARBONE C, VERDE L, WANG Y, et al. Neutrino constraints from future nearly all-sky spectroscopic galaxy surveys[J]. *JCAP*, 2011, 3: 030
- [22] SPRENGER T, ARCHIDIACONO M, BRINCKMANN T, et al. Cosmology in the era of Euclid and the Square Kilometre Array[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2019(2): 47
- [23] MAJEROTTO E, VÄLIVIITA J, MAJEROTTO E, et al. Instability in interacting dark energy and dark matter fluids[J]. *Nuclear Physics B-proceedings Supplements*, 2009, 194: 260
- [24] HE J W, WANG B, ABDALLA E. Stability of the curvature perturbation in dark sectors' mutual interacting models[J]. *Physics Letters B*, 2009, 671: 139
- [25] VIKMAN A. Can dark energy evolve to the Phantom?[J]. *Physical Review D*, 2005, 71: 023515
- [26] HU W. Crossing the phantom divide: dark energy internal degrees of freedom[J]. *Physical Review D*, 2005, 71: 047301
- [27] LI Y H, ZHANG J F, ZHANG X. Testing models of vacuum energy interacting with cold dark matter[J]. *Physical Review*, 2016, 93: 023002
- [28] GUO R Y, LI Y H, ZHANG J F, et al. Weighing neutrinos in the scenario of vacuum energy interacting with cold dark matter: application of the parameterized post-Friedmann approach[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2017, 1705: 40

- [29] ZHANG X. Probing the interaction between dark energy and dark matter with the parametrized post-Friedmann approach[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 60: 050431
- [30] DAI J P, XIA J Q. Revisiting the instability problem of the interacting dark energy model in the parameterized post-Friedmann framework[J]. *APJ*, 2019, 876(2): 125
- [31] 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[J]. *科学通报*, 2015, 60(34): 3337
- [32] FANG W J, HU W, LEWIS A. Crossing the phantom divide with parametrized post-Friedmann dark energy[J]. *Phys Rev D*, 2008, 78: 087303
- [33] SMITH R E, PEACOCK J A, JENKINS A, et al. Stable clustering, the halo model and nonlinear cosmological power spectra[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2003, 341: 1311
- [34] AUDREN B, LESGOURGUES J, BIRD S, et al. Neutrino masses and cosmological parameters from a euclid-like survey: Markov Chain Monte Carlo forecasts including theoretical errors[J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2013, 1301: 026
- [35] 史峰, 杨小虎. 基于红移畸变测量宇宙结构增长率的进展[J]. *天文学进展*, 2019, 37(1): 27
- [36] 张骏. 弱引力透镜效应的精确测量及其宇宙学应用[C]. 杭州: 中国极地科学学术年会, 2012
- [37] VALENTINO E D, BRINCKMANN T, GERBINO M, et al. Exploring cosmic origins with CORE: cosmological parameters[OB/OL]. [2020-03-15]. arXiv: 1612.00021
- [38] BEUTLER F, BLAKE C, et al. The 6dF galaxy survey: baryon acoustic oscillations and the local hubble constant[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2011, 416: 3017
- [39] ANDERSON L, AUBOURG E, BAILEY S, et al. The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon oscillation spectroscopic survey: baryon acoustic oscillations in the data release 9 spectroscopic galaxy sample[J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2013, 427: 3435
- [40] 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  $z = 0.15$ [J]. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2015, 449: 835
- [41] AMANULLAH R, et al. Spectra and light curves of six type Ia Supernovae at  $0.511 < z < 1.12$  and the Union2 Compilation[J]. *Astrophys J*, 2010, 716: 712
- [42] BENJAMIN A, JULIEN L, KARIM B, et al. Conservative constraints on early cosmology: an illustration of the monte python cosmological parameter inference code[EB/OL]. [2020-03-15]. arXiv, 2012, 1210.7183v2

## Forecasting the interaction in dark matter-dark energy models from Euclid-like galaxy survey

MA Xiaojiao   DAI Jiping   XIA Junqing<sup>†</sup>

( Department of Astronomy, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** Euclid is a European Space Agency (ESA) plan to start space galaxy survey in 2022. ESA will use two complementary cosmological probes to capture signatures of the expansion rate of the Universe and the growth of cosmic structures-galaxy clustering and cosmic shear, to study the dark energy model of interaction. Here we simulate Euclid galaxy survey data with nonlinear theoretical uncertainty error, and use Markov Chain Monte Carlo (MCMC) algorithm to constrain interacting dark energy model ( $w$ CDM) in complete parameter space with cosmic microwave background radiation (CMB), baryonic acoustic oscillation (BAO) and type Ia supernovae (SNe Ia). To study restriction ability of Euclid on coupling constant ( $\beta$ ), dark energy equation of state ( $w$ ) and other parameters of different interaction dark energy models, we compared four interaction dark energy models with CMB + BAO + SNe and Euclid + CMB + BAO + SNe. Euclid + CMB + BAO + SNe were found to give more stringent constraints on interacting dark energy models except  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de}\nu_{de}$ . With CMB+BAO+SNe, deviations of  $\beta$  from 0 were found to be  $>1.2\sigma$  for all four models. With Euclid+CMB+BAO+SNe, deviations of  $\beta$  from 0 were  $>1\sigma$  for models of  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c\nu_c$ ,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_c\nu_{de}$ ,  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de}\nu_c$ , but were  $>1.9\sigma$  for  $Q_{de} \propto 3\beta H\rho_{de}\nu_{de}$ . Euclid is a potential survey experiment, combined with CMB, SNe, Hubble parameter data (OHD) and other cosmological probes. Euclid will help to further understand properties of dark energy and dark matter.

**Keywords** interacting dark energy model; Euclid galaxy survey; uncertainty error nonlinear theory

【责任编辑: 陆有忠】