

非平坦宇宙中相互作用的鬼场暗能量模型^①

袁通全^{1,2}, 张德维²

1. 河池学院 数理学院, 广西 河池 546300; 2. 马来西亚英迪国际大学 工程学系, 尼莱 71800, 马来西亚

摘要: 研究了非平坦宇宙中具有实验数值约束的相互作用鬼场暗能量. 根据暗能量与哈勃函数的线性关系, 发现暗能量与冷暗物质之间的非引力相互作用导致了能量由冷暗物质向暗能量的转移, 得到了非平坦宇宙中相互作用的鬼场暗能量密度及其状态方程和宇宙减速参数的宇宙学演化的解析式. 基于对状态方程 ω_D 现值的天文观测, 对相互作用因子施加了限制, 发现 ω_{D0} 与相互作用因子呈简单的反线性关系, 宇宙减速参数 $q \in [-0.91, -0.38]$ 均为负值, 这与天文观测的宇宙加速膨胀是一致的.

关键词: 鬼场暗能量; Friedman 方程; 状态参量; 宇宙减速因子

中图分类号: O412

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2023)07-0073-07

On Interacting Ghost Dark Energy Model in Non-flat Universe

YUAN Tongquan^{1,2}, CHONG Tet Vui²

1. School of Mathematics and Physics, Hechi University, Hechi 546300, China;

2. Faculty of Engineering and Quantity Surveying, INTI International University, 71800, Nilai Malaysia

Abstract: An interacting ghost dark energy with experimental constraint in non-flat universe studied in this report. On the basis of the linear relation between dark energy and the Hubble function, it is found that the non-gravitational interaction between dark energy and cold dark matter results in the transfer of cold dark matter to dark energy. The Cosmological evolution of the interacting ghost dark energy density, its equation of state and the deceleration parameters in non-flat universe are obtained analytically. Based on the astronomical observations on the present value of the energy density of state ω_{D0} , we imposed restrictions on the interaction factor. It is found that there is a simple reverse linear relationship between ω_{D0} and the interaction factor and all the deceleration parameters $q \in [-0.91, -0.38]$ are negative, which is well-agreed with the astronomic observation on the accelerated expansion of the universe.

Key words: ghost dark energy; Friedman equation; the parameter of equation of state; deceleration parameters of the universe

对 Ia 型超新星^[1-3]、大尺度结构^[4-5]和宇宙微波背景各向异性^[6]的天文观测令人信服地证实了宇宙的加速膨胀. 到目前为止, 宇宙学家已经提出了许多理论模型, 目前被广泛接受的是利用暗能量来解释宇宙膨胀的原因. 暗能量必须满足其压强为负的条件, 从而导致宇宙加速膨胀. 暗能量的性质和起源的最明显的候

① 收稿日期: 2022-12-02

基金项目: 广西高校科学技术研究项目(KY2015LX329).

作者简介: 袁通全, 副教授, 主要从事相对论和量子力学研究.

选者是宇宙学常数^[7-8], 它的状态方程为 $\omega_D = -1$. 然而, 这种解释本身不可避免地带来了进一步的困难, 如微调问题等. 为此, 人们提出了一系列替代的理论模型. 特别是一组标量场暗能量理论, 包括 Quintessence^[9-14], K-essence^[15-16], tachyon^[17-20], Phantom^[21], ghost 凝聚模型^[22-23] 和 quintom 模型^[24-29]、Brane-world 模型^[30] 和 Chaplygin 气体模型^[31] 等都得到了广泛的研究. 进一步的研究表明, 暗能量贡献了宇宙总能量密度的 70% 左右. 其余的贡献主要是被称为“暗物质”(约 26%)^[32] 的奇异成分. 然而, 即使在过去 20 年里进行了一系列观测任务之后, 暗能量的起源、性质和动力学还是未知的. 宇宙的能量密度主要由两部分组成, 即冷暗物质和暗能量. 人们自然而然会想到的一个问题是: 它们之间是否会相互作用, 是否会相互转化. 为此, 一些学者已经提出了所谓的相互作用暗能量模型^[33-40], 即在保持总能量密度守恒的条件下, 在冷暗物质或标量场与暗能量之间引入非引力相互作用项 Q . 假设状态方程为常数, Q 正值表示能量从冷暗物质转移到暗能量, 而 Q 负值则相反, 即能量从暗能量转移到冷暗物质, 因此 Q 被称为能量转移速率. PAN S 等^[38] 给出了相互作用暗能量模型的场论分析. 为了解释暗能量的来源, 人们提出了一个有趣的模型, 称为鬼场暗能量模型^[41-48], 该模型认为暗能量来自鬼场的贡献. 它的要素是暗能量密度与哈勃参数成正比, 即 $\rho_D = \alpha H$, 其中 α 是与 Λ_{QCD}^3 量纲相同的常数, Λ_{QCD} 是 QCD 质量标度. 本研究将基于这一观点, 在第 1 节部分对鬼场暗能量模型作更详细的介绍, 并基于暗能量起源于鬼场的观点, 考虑冷暗物质与暗能量之间的非引力相互作用, 得到冷暗物质与暗能量的能量密度、暗能量的状态方程以及相互作用鬼场暗能量模型下宇宙的减速参数的解析表达式. 在该模型中, 由于受暗能量当前状态方程观测值的限制, 非引力相互作用函数取正值, 能量从冷暗物质转移到暗能量, 并且 ω_{D0} 与相互作用因子之间存在简单的反线性关系, 宇宙减速参数 q 是负的, 这与天文观测的宇宙加速膨胀是一致的.

1 鬼场暗能量模型

文献^[41-48]提出了一种新的暗能量模型, 即所谓的 Veneziano 鬼场暗能量. 这个新模型的关键要素是: 在通常的闵可夫斯基时空量子场论中, Veneziano 鬼场是非物理的, 但它在动力学时空或具有非平凡拓扑的时空中表现出重要的物理效应. Veneziano 鬼场被认为是为了解决 QCD 低能有效理论中的 $U(1)$ 问题而存在^[49-52]. 在闵可夫斯基时空中, 鬼场对真空能量密度没有贡献. 然而, 在弯曲时空中, 它会产生与 Λ_{QCD}^3 成比例的小真空能量密度^[53-55], 其中 $\Lambda_{\text{QCD}} \sim 100 \text{ MeV}$ 是 QCD 质量标度和 $H \sim 10^{-33} \text{ eV}$ 是哈勃参数. $\Lambda_{\text{QCD}}^3 H \sim (3 \times 10^{-3} \text{ eV})^4$ 给出了观察到的暗能量密度的正确量级. 这种数值上的一致性很明显, 也意味着该模型摆脱了微调问题^[41-42, 44]. 请注意, 在这个鬼场暗能量模型中, 没有不需要的特征, 如违反规范不变性、么正性、因果关系等^[41, 43, 53-55]. 事实上, 由于 Veneziano 鬼场不是物理传播自由度, 所以用 Veneziano 鬼场来描述强耦合 QCD 的非常复杂的红外动力学只是一个方便的问题. 不使用鬼场, 可以通过一些其他方法(例如直接晶格模拟)来描述相同的动力学. 这种模型的最大优点是它完全嵌入到标准模型和广义相对论, 不需要引入任何新的参数、新的自由度或修改引力. 为了使暗能量的状态方程能够与 -1 交叉, 引入了 Veneziano 鬼场, 它与其他文献中一些暗能量模型中的那些鬼场截然不同, 在那里鬼场是真实的物理自由度. 另一方面, 真空能量通常会被指数抑制, 因为 QCD 是一个有质量间隙的理论, 而不是哈勃参数的线性理论. 这一有趣的提议认为, 宇宙学常数是由 QCD 低能有效理论中假定存在的鬼场的贡献产生的. 其主要观点是暗能量密度与哈勃参数成正比, 即 $\rho_D = \alpha H$. 尽管文献^[47]认为暗能量密度包括 H 的二次方, 但仅包括 H 的一次方是最简单的, 这使得我们研究的模型具有解析解.

2 相互作用鬼场暗能量模型

相互作用鬼场暗能量模型假定冷暗物质和暗能量之间存在非引力相互作用. 而且, 假定暗能量来自鬼场的贡献. 由于 WMAP 5 年的数据^[56] 在 95% 的置信度水平下约束现有宇宙的曲率为 $-0.0175 < \Omega_k < 0.0085$, 并且鬼场暗能量是宇宙物质的一部分, 所以将平坦宇宙推广到非平坦宇宙. 描述 4 维均匀各向同性宇宙的线元, 被称为 FLRW 时空, 可写成^[57]:

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right] \quad (1)$$

其中: $a(t)$ 是以宇宙时 t 为自变量的尺度因子, 而 $K = -1, 0, 1$ 分别对应于开放的、平坦的和闭合的宇宙. 宇宙动力学是通过解爱因斯坦场方程:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (2)$$

来得到的. 对于度规(1), 爱因斯坦场方程的(00) 分量给出^[57]:

$$H^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{1}{3M_p^2}(\rho_m + \rho_D) \quad (3)$$

其中: ρ_m 和 ρ_D 分别为零压冷暗物质能量密度和鬼场暗能量密度, 而且约化普朗克质量 M_p 满足 $\frac{1}{3M_p^2} = 8\pi G$.

定义无量纲能量密度为:

$$\Omega_D = \frac{\rho_D}{\rho_{cr}} = \frac{\rho_D}{3M_p^2 H^2}, \Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{cr}} = \frac{\rho_m}{3M_p^2 H^2}, \Omega_k = -\frac{\rho_k}{\rho_{cr}} = -\frac{K}{a^2 H^2} \quad (4)$$

用无量纲能量密度表示, Friedman 方程(3) 变成:

$$\Omega_m + \Omega_D + \Omega_k = 1 \quad (5)$$

零压强冷暗物质和暗能量守恒方程分别被假定为:

$$\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = Q \quad (6)$$

和

$$\dot{\rho}_D + 3H\rho_D(1 + \omega_D) = -Q \quad (7)$$

(对应于引入 Q 项后能量动量张量 $T_{\mu\nu}$ 的每个分量守恒), 其中 $\omega_D = P_D/\rho_D$ 是暗能量压强与其密度的比值, 即暗能量状态方程参量, $Q(\rho_m, \rho_D)$ 表示可以取不同形式的非引力相互作用项. 本研究将非引力相互作用函数设为 $Q = 3H\delta\rho_m$, δ 为相互作用因子. 值得注意的是, 连续性方程意味着非引力相互作用函数应该是一个以时间倒数为单位的量(第一个自然选择可以是哈勃因子) 乘以能量密度. 因此, 非引力相互作用项可以取不同的形式, 例如文献[45, 48] 考虑了 $Q \propto H(\rho_m + \rho_D)$, 选择 Q 的形式是最简单的, 物理意义更清晰. 从等式(6) 可以得出 $\rho_m = \rho_{m0} a^{-3(1-\delta)}$. 为了使冷暗物质的密度随着 a 的增加而降低, 相互作用因子 δ 必须小于 1. 然而, 观测到暗能量状态方程参量的当前值 ω_{D0} 仍然对相互作用因子 δ 有更严格的限制. 利用(4) 式中无量纲的能量密度, (6) 式变为:

$$\dot{\Omega}_m + \frac{2\dot{H}}{H}\Omega_m + 3H\Omega_m = Q \quad (8)$$

同时(7) 式变成:

$$\dot{\Omega}_D + \frac{2\dot{H}}{H}\Omega_D + 3(1 + \omega_D)H\Omega_D = -Q \quad (9)$$

由(5)、(8) 和(9) 式可得:

$$\omega_D = -\frac{1}{\Omega_D} \left(\frac{2}{3} \frac{\dot{H}}{H^2} + 1 - \frac{1}{3} \Omega_k \right) \quad (10)$$

把由(3) 式得到的 $\dot{\rho}_m$ 带入(6) 式, 同时考虑到 $\rho_D = \alpha H$, 得到:

$$\frac{\dot{H}}{H^2} = -\frac{3\Omega_m(1 - \delta) + 2\Omega_k}{(2 - \Omega_D)} \quad (11)$$

从而暗能量状态方程和无量纲暗能量密度分别为:

$$\omega_D(a, \delta) = -\frac{1}{(2 - \Omega_D)} \left[1 + \frac{1}{3} \Omega_k + 2\delta \frac{\Omega_m}{\Omega_D} \right] \quad (12)$$

和

$$\Omega_D = \Omega_{D0} \frac{H_0}{H}$$

其中已经令 $a = a_0 = 1$ 时, $H = H_0$, $\Omega_D = \Omega_{D0}$. 由(3) 式可得:

$$E = \frac{H}{H_0} = \frac{1}{2} \Omega_{D0} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \Omega_{D0}\right)^2 + \Omega_{k0} a^{-2} + \Omega_{m0} a^{-3(1-\delta)}} \quad (13)$$

应该注意的是, 与(13)式一起还有另一个解是 $E(a=1)=0$, 对应于最后缩小的宇宙, 被省略了. 因此:

$$\Omega_D = \Omega_{D0} E^{-1}, \Omega_m = \Omega_{m0} E^{-2} a^{-3(1-\delta)}, \Omega_k = \Omega_{k0} a^{-2} E^{-2} \quad (14)$$

这些能量密度是解析形式的. 图 1 显示了无量纲能量密度随宇宙尺度因子 a 的变化, 图 2 显示了无量纲能量密度随相互作用因子 δ 的变化, 其中取 $\Omega_{m0}=0.26$, $\Omega_{D0}=0.73$ 和 $\Omega_{k0}=0.01$. 图 1 中相互作用因子 $\delta=0$ 的线对应于冷暗物质与暗能量间不存在相互作用的情况. 图像显示, 随着宇宙尺度因子 a 的增加, 在没有非引力相互作用的情况下, 冷暗物质的无量纲能量密度从初始最大值逐渐减小, 而无量纲暗能量密度由于鬼场的贡献而从最小值逐渐增加. 非引力相互作用的出现, 使得冷暗物质的能量密度立即降低, 即转化为暗能量. 这是因为 ω_{D0} 的天文观测值要求相互作用因子 δ 为正, 导致非引力函数 Q 为正值. 与文献[58]不同, 其中 $Q=3H\delta(1+\omega_D)\rho_D$, 对于 $\omega_D > -1$ 的情况, 能量从冷暗物质到暗能量流动, 而对于 $\omega_D < -1$, 能量流动方向相反. 当宇宙尺度因子在图 2 中的 4 种情况下恒定时, 暗能量和冷暗物质之间的非引力相互作用使 Ω_m 减少, Ω_D 增加, 即零压强冷暗物质转化为暗能量. 如果当前的无量纲曲率 Ω_{k0} 接近 0.01 ($K=-1$), 则宇宙是开放的. 从方程可以看出, 无量纲曲率密度随宇宙尺度因子的增大而逐渐减小. 在 95% 置信水平下, 来自 WMAP 5 年数据和其他观测数据的暗能量状态方程的边界为 $-1.29 < \omega_{D0} < -0.790^{[56]}$. 从(12)式可以看出, ω_{D0} 和相互作用因子 δ 之间存在简单的反线性关系. 状态方程的现值 ω_{D0} 限制了 $\delta \in (0.0048, 0.894)$ 的范围. 不同 δ 值的状态方程的演变见图 3. 相互作用因子 $\delta=0.378$ 的线对应于状态方程 $\omega_{D0}=-1$. 相互作用因子 $\delta=0$, $\Omega_{k0}=0$ 时的 $\omega_{D0}=-0.784$ 以及相互作用因子 $\delta=0$, $\Omega_{k0}=0.01$ 时 $\omega_{D0}=-0.787$, 两个 ω_{D0} 的值显然都超出了其观测的取值范围. 因此, 可以得出结论, 宇宙是平坦的, 暗能量和冷暗物质之间的相互作用不存在, 这可能是不允许的. 当然, 由于观测到的 $\Omega_{k0} \in (-0.0175, 0.0081)$ 非常小, 可以认为宇宙是近似平坦的, 但暗能量和冷暗物质之间必须存在相互作用, 因此将 Ω_{k0} 的值取为 0.01.

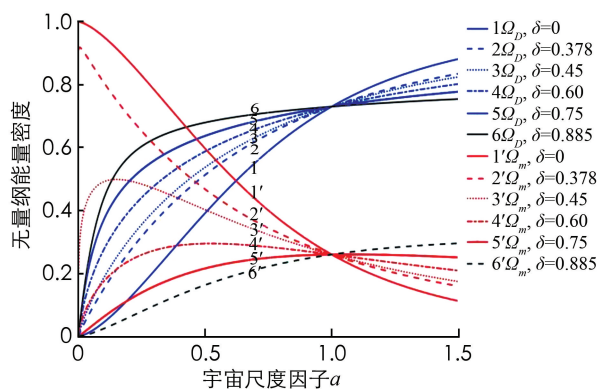


图 1 无量纲能量密度随宇宙尺度因子 a 的变化
还可以计算宇宙减速参数, 其定义为:

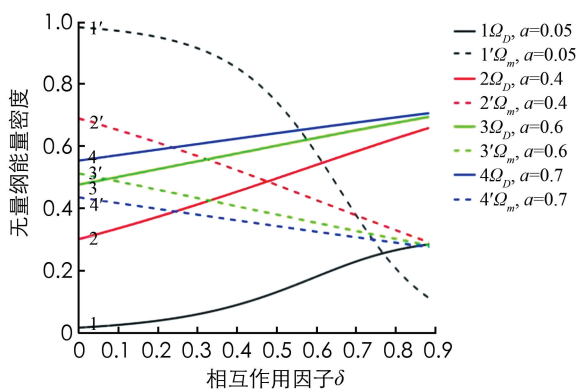


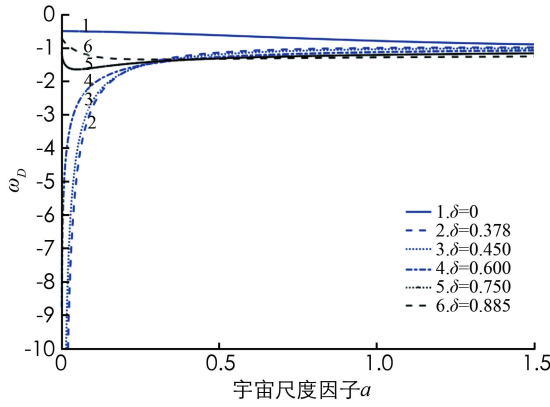
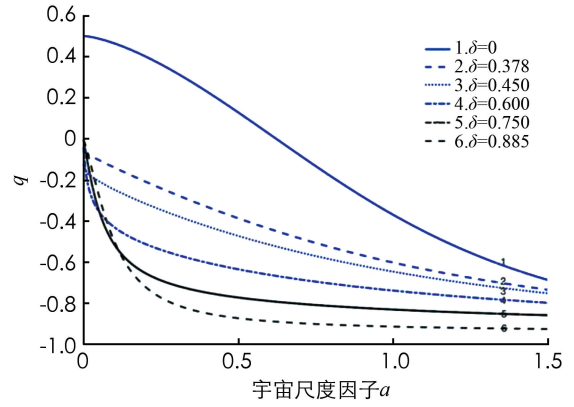
图 2 无量纲能量密度随相互作用因子 δ 的变化

$$q = -1 - \frac{\dot{H}}{H^2} \quad (15)$$

把(11)式代入(15)式后, 可得:

$$q = -1 + \frac{3\Omega_m(1-\delta) + 2\Omega_k}{(2-\Omega_D)} \quad (16)$$

能量密度 Ω_m , Ω_D 和 Ω_K 的表达式已在(14)式给出. 相对于宇宙尺度因子的宇宙减速参数见图 4. 可以在图 4 中看到, 减速参数 $q_0(a=1) \in [-0.91, -0.38]$ 的所有值均为负值, 这与宇宙加速膨胀的天文观测结果一致. 本研究的结果与参考文献[59]一致, 其中 $q_0 = -0.48 \pm 0.1$ 来自 192 颗超新星的样品数据值, $q_0 = -0.65 \pm 0.5$ 来自射电星系数据值. 此外, 还看到宇宙减速参数与相互作用因子 δ 有关. 相互作用越强, 减速参数越负, 宇宙加速膨胀越快.

图 3 暗能量状态方程随宇宙尺度因子 a 的变化图 4 宇宙减速参数随宇宙尺度因子 a 的变化

3 结论

本研究求解了相互作用的鬼场暗能量模型, 其中在总能量密度守恒的条件下, 可以引入冷暗物质和暗能量之间的非引力相互作用函数. 该模型的优点是可以解析地给出无量纲能量密度、状态方程参数和宇宙减速因子. 在原始的相互作用暗能量模型中, 非引力相互作用函数可以是正的也可以是负的, 能量转换可以从冷暗物质到暗能量, 也可以是逆流. 研究发现, 在本文给出的模型中, 冷暗物质与暗能量之间的非引力相互作用函数更倾向于正值, 这导致能量从冷暗物质转移到暗能量. 相互作用因子的值是以暗能量的当前方程状态为界来选择的, 并且由相互作用因子值给出的减速因子的当前值与观测值非常一致.

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] PERLMUTTER S, ALDERING G, GOLDHABER G, et al. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1999, 517(2): 565-586.
- [3] ASTIER P, GUY J, REGNAULT N et al. The Supernova Legacy Survey: Measurement of Ω_m , Ω_Λ and w from the First Year Data Set [J]. *Astronomical Journal*, 2006, 147(1): 31-48.
- [4] ABAZAJIAN K, ADELMAN-MCCARTHY J K and AGÜEROS M A, et al. The Second Data Release of the Sloan Digital Sky Survey [J]. *The Astronomical Journal*, 2004, 128(1): 502-512.
- [5] ABAZAJIAN K, ADELMAN-MCCARTHY J K, AGÜEROS M A, et al. The Third Data Release of the Sloan Digital Sky Survey [J]. *The Astronomical Journal*, 2005, 129(3): 1755-1959.
- [6] SPERGEL D N, VERDE L and PEIRIS H V, et al. First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: determination of cosmological parameters [J]. *The Astrophysical Journal Letters Supplement Series*, 2003, 148(1): 175-194.
- [7] SAHNI V, STAROBINSKY A A. The Case for a Positive Cosmological Λ -term [J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2000, 9(4): 373-443.
- [8] PEEBLES P J E, RATRA B. The Cosmological Constant and Dark Energy [J]. *Reviews of Modern Physics*, 75(2): 559-606.
- [9] PEEBLES P J E, RATRA B. Cosmology with a Time-Variable Cosmological "Constant" [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 1988, 325: L17-L20.
- [10] RATRA B, PEEBLES P J E. Cosmological Consequences of a Rolling Homogeneous Scalar Field [J]. *Physical Review D*, 1988, 37(12): 3406-3427.
- [11] WETTERICH C. Cosmology and the Fate of Dilatation Symmetry [J]. *Nuclear Physics B*, 1988, 302(4): 668-696.
- [12] FRIEMAN J A, HILL C T, STEBBINS A, et al. Cosmology with Ultralight Pseudo Nambu-Goldstone Bosons [J]. *physical Review Letters*, 1995, 75(11): 2077-2080.
- [13] TURNER M S, WHITE M. CDM Models with a Smooth Component [J]. *Physical Review D*, 56(8): R4439-R4443.

- [14] CALDWELL R R, DAVE R, STEINHARDT P J. Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation of State [J]. Physical Review Letters, 1998, 80(8): 1582-1585.
- [15] ARMENDARIZ-PICON C, MUKHANOV V, STEINHARDT P J. Dynamical Solution to the Problem of a Small Cosmological Constant and Late-Time Cosmic Acceleration [J]. Physical Review Letter, 2000, 85(21): 4438-4441.
- [16] ARMENDARIZ-PICON C, MUKHANOV V, STEINHARDT P J. Essentials of k -Essence [J]. Physical Review D, 2001, 63(10): 103510.
- [17] 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(1-2): 23-29.
- [18] CALDWELL R R, KAMIONKOWSKI M, WEINBERG N N. Phantom Energy: Dark Energy with $w < -1$ Causes a Cosmic Doomsday [J]. Physical Review Letters, 2003, 91(7): 071301.
- [19] SHIN'ICHI NOJIRI, ODINTSOV S D. Quantum de Sitter Cosmology and Phantom Matter [J]. Physics Letters B, 2003, 562(3-4): 147-152.
- [20] SHIN'ICHI NOJIRI, ODINTSOV S D. De Sitter Brane Universe Induced by Phantom and Quantum Effects [J]. Physics Letters B, 2003, 565: 1-9.
- [21] SEN A. Tachyon Matter [J]. Journal of High Energy Physics, 2002(7): 65.
- [22] HAMED N A, CHENG H S, LUTY M A, et al. Ghost Condensation and a Consistent Infrared Modification of Gravity [J]. Journal of High Energy Physics, 2004(5): 74.
- [23] PIAZZA F, TSUJIKAWA S. Dilatonic Ghost Condensate as Dark Energy [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2004(7): 4.
- [24] FENG B, WANG X L, ZHANG X M. Dark Energy Constraints from the Cosmic Age and Supernova [J]. Physics Letters B, 2005, 607(1-2): 35-41.
- [25] GUO Z K, PIAO Y S, ZHANG X M, et al. Cosmological Evolution of a Quintom Model of Dark Energy [J]. Physics Letters B, 2005, 608(3-4): 177-182.
- [26] ZHANF X. An Interacting Two-Fluid Scenario for Quintom Dark Energy [J]. Communications in Theoretical Physics, 2005, 44(4): 762-768.
- [27] ANISIMOV A, BABICHEV E, VIKMAN A. B-inflation [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2005, 6: 6.
- [28] ELIZALDE E, NOJIRI S, ODINTSOV S D. Late-Time Cosmology in a (Phantom) Scalar-Tensor Theory: Dark Energy and the Cosmic Speed-Up [J]. Physical Review D, 2004, 70(4): 043539.
- [29] NOJIRI S, ODINTSOV S D, TSUJIKAWA S. Properties of Singularities in the (Phantom) Dark Energy Universe [J]. Physical Review D, 2005, 71(6): 063004.
- [30] DEFFAYET C, DVALI G, GABADADZE G. Accelerated Universe from Gravity Leaking to Extra Dimensions [J]. Physical Review D, 2002, 65(4): 044023.
- [31] KAMENSHCHIK A, MOSCHELLA U, PASQUIER V. An Alternative to Quintessence [J]. Physics Letters B, 2001, 511(2-4): 265-268.
- [32] AGHANIM N, AKRAMI Y, ASHDOWN M, et al. Planck 2018 Results [J]. Astronomy & Astrophysics, 2020, 641: A6.
- [33] AMENDOLA L. Coupled Quintessence [J]. Physical Review D, 2000, 62(4): 043511.
- [34] GUO Z K, OHTA N, TSUJIKAWA S. Probing the Coupling Between Dark Components of the Universe [J]. Physical Review D, 2007, 76(2): 023508.
- [35] DALAL N, ABAZAJIAN K and JENKINS E, et al. Testing the Cosmic Coincidence Problem and the Nature of Dark Energy [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(14): 141302.
- [36] CAMPO S D, HERRERA R, OLIVARES G, et al. Interacting Models of Soft Coincidence [J]. Physical Review D, 2006, 74(2): 023501.
- [37] VALENTINO E D, MELCHIORRI A, MENA O, et al. Interacting Dark Energy in a Closed Universe [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2021, 502(1): L23-L28.
- [38] PAN S, SHAROV G S, Yang wei qiang. Field Theoretic Interpretations of Interacting Dark Energy Scenarios and Recent Observations [J]. Physical Review D, 2020, 101(10): 103533.
- [39] PAN S, YANG W Q, SINGHA C, et al. Observational Constraints on Sign-Changeable Interaction Models and Alleviation of the H_0 tension [J]. Physical Review D, 2019, 100(8): 083539.

- [40] BOLOTIN Y L, KOSTENKO A, LEMETS O A, et al. Cosmological Evolution with Interaction Between Dark Energy and Dark Matter [J]. International Journal of Modern Physics D, 2015, 24(03): 1530007.
- [41] URBAN F R, ZHITNITSKY A R. The Cosmological Constant from the QCD Veneziano Ghost [J]. Physics Letters B, 2010, 688(1): 9-12.
- [42] URBAN F R, ZHITNITSKY A R. Cosmological Constant from the Ghost: A Toy Model [J]. Physical Review D, 2009, 80(6): 063001.
- [43] URBAN F R, ZHITNITSKY A R. Cosmological Constant, Violation of Cosmological Isotropy and CMB [J]. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2009, 9(18): 1-12.
- [44] OHTA N. Dark Energy and QCD Ghost [J]. Physics Letters B, 2011, 695(1-4): 41-44.
- [45] LIU Y. Interacting Ghost Dark Energy in Complex Quintessence Theory [J]. The European Physical Journal C, 2020, 80: 1204.
- [46] CAI R G, TUO Z L, ZHANG H B, et al. Notes on Ghost Dark Energy [J]. Physical Review D, 2011, 84(12): 123501.
- [47] CAI R G, TUO Z L, ZHANG H B, et al. More on QCD Ghost Dark Energy [J]. Physical Review D, 2012, 86(2): 023511.
- [48] SHEYKHI A, MOVAHED M S. Interacting Ghost Dark Energy in Non-flat Universe [J]. General Relativity and Gravitation, 2012, 44(2): 449-465.
- [49] VENEZIANO G. U(1) Without Instantons [J]. Nuclear Physics B, 1979, 159(1-2): 213-224.
- [50] ROSENZWEIG C, SCHECHTER J, TRAHERN C G. Is the Effective Lagrangian for Quantum Chromodynamics a σ model? [J]. Physical Review D, 1980, 21(12): 3388.
- [51] NATH P, ARNOWITT R. U(1) Problem: Current Algebra and the θ Vacuum [J]. Physical Review D, 1981, 23(2): 473-476.
- [52] KAWARABAYASHI K, OHTA N. On the Partial Conservation of the U(1) Current [J]. Progress of Theoretical Physics, 1981, 66(5): 1789-1802.
- [53] HOLDOM B. From Confinement to Dark Energy [J]. Physics Letters B, 2011, 697(4): 351-356.
- [54] ZHITNITSKY A R. Entropy, Contact Interaction with Horizon, and Dark Energy [J]. Physical Review D, 2011, 84(12): 124008.
- [55] THOMAS E, ZHITNITSKY A R. Topological Susceptibility and Contact Term in QCD: A Toy Model [J]. Physical Review D, 2012, 85(4): 044039.
- [56] KOMATSU E, DUNKLEY J, NOLTA M R, et al. Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2009, 180(2): 330-376.
- [57] WEINBERG S. Gravitation, Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity [M]. New York: Wiley and Sons, 1972: 151-172.
- [58] YANG W Q, MUKHERJEE A, VALENTINO E D, et al. Interacting Dark Energy with Time Varying Equation of State and the H_0 Tension, Physical Review D, 2018, 98(12): 123527.
- [59] DALY R A, DJOROVSKI S G, FREEMAN K A, et al. Improved Constraints on the Acceleration History of the Universe and the Properties of the Dark Energy [J]. The Astrophysical Journal, 2008, 677(1): 1-11.

责任编辑 潘春燕