

Revisit of New Agegraphic Tachyon Dark Energy Model

Jinglei Cui, Jingfei Zhang

Department of Physics, College of Sciences, Northeastern University, Shenyang
Email: owldasw@163.com, jfzhang@mail.neu.edu.cn

Received: Dec. 19th, 2012; revised: Jan. 26th, 2013; accepted: Feb. 28th, 2013

Copyright © 2013 Jinglei Cui, Jingfei Zhang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: New agegraphic dark energy model is proposed based on the gravitational effect in general relativity together with the uncertainty relation of quantum mechanics. As one among candidates for dark energy, dynamical scalar field model can be viewed as an effective description of the underlying theory of dark energy. We reconstruct a scalar field to describe the cosmological evolution of the new agegraphic dark energy through the correspondence relationship between new agegraphic dark energy and scalar field like tachyon field. In this paper, we reconstruct new agegraphic tachyon dark energy model, in a flat universe with dark energy, matter and radiation. Subsequently, we obtain the dynamical evolution of the tachyon potential $V(\phi)$ and the tachyon scalar field $\phi(z)$ by the best-fit parameters: model parameter n , the Hubble parameter h and Ω_{m0} constrained by the latest observational data.

Keywords: New Agegraphic Dark Energy; Tachyon; Scalar Field Model Reconstruction; Cosmological Evolution

新 Agegraphic 快子暗能量模型再探讨

崔晶磊, 张敬飞

东北大学理学院物理系, 沈阳
Email: owldasw@163.com, jfzhang@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 12 月 19 日; 修回日期: 2013 年 1 月 26 日; 录用日期: 2013 年 2 月 28 日

摘要: 新 agegraphic 暗能量模型是依据量子力学的不确定性关系和广义相对论中的引力效应提出的。作为暗能量的候选者之一, 动力学标量场被认为是暗能量基本理论的有效描述。本文把新 agegraphic 暗能量和标量场对应起来, 构造具有新 agegraphic 暗能量性质的标量场模型, 并利用观测数据来确定该标量场的拉氏量具体形式。本文考虑由暗能量、物质和辐射组成的平坦宇宙, 通过标量场之一的快子场和新 agegraphic 暗能量的对应构造一个新 agegraphic 快子暗能量模型。参考最新拟合的模型参数 n 、哈勃常数 h 和 Ω_{m0} , 得到新 agegraphic 快子暗能量模型标量场势能 $V(\phi)$ 和快子场 $\phi(z)$ 的演化。

关键词: 新 Agegraphic 暗能量; 快子; 标量场模型重构; 宇宙学演化

1. 引言

目前, 一些研究^[1,2]已经表明宇宙正在加速膨胀。在此之前, 因为牛顿的万有引力, 我们认为宇宙的膨胀应该是减速的, 那么导致加速膨胀的物质一定可以产生排斥性“引力”, 或者说它具有负压强, 我们称这种物质为“暗能量”。根据当前宇宙学观测的联合

分析, 宇宙中的原子物质占总能量的 4%, 暗物质约占 23%, 而主导宇宙演化的暗能量约占 73%。尽管暗能量的本质我们还不清楚, 但是对暗能量的研究已经成为现代宇宙学中的核心问题之一。

为了描述暗能量的性质, 宇宙学家提出了很多暗能量候选者。最简单的候选者就是宇宙学常数模型。

宇宙学常数是爱因斯坦为了构建静态宇宙而引入的，现在的研究已经赋予它更深层次的意义。如果暗能量是宇宙学常数的话，可以很好地解释当前的观测数据，但是它也存在一些理论问题，即精细调节问题和宇宙巧合问题。宇宙学常数模型认为暗能量的状态方程参量不随时间变化，即 $w_\Lambda = -1$ ，但是为了缓解宇宙巧合问题，人们希望物态方程是随时间变化的，而且目前的观测结果也表明，驱动宇宙加速膨胀的暗能量可能是动力学演化的，只是这种演化是非常缓慢的。于是一些人开始考虑动力学标量场模型，动力学暗能量通常是由一类空间均匀的标量场实现的，这类标量场在其自作用势中缓慢滚动因而提供了足够的负压强来驱动宇宙加速膨胀。标量场模型被认为是暗能量基本理论的有效描述。到目前为止，研究者已经提出了很多种暗能量的标量场模型，例如精质模型^[3]，幽灵模型^[4]，快子模型^[5]，精灵模型^[6]等，本文主要讨论快子模型。

从本质上说，暗能量问题是一个量子引力问题。尽管目前还没有一个完整的量子引力理论，但一些理论物理学家考虑在量子引力框架下来研究暗能量问题的可能性。李森根据量子引力的基本原理——全息原理——提出了全息暗能量模型^[7]；蔡荣根依据量子力学的不确定性关系和广义相对论中的引力效应提出了 agegraphic 暗能量模型^[8]，之后又经过修正成为新 agegraphic 暗能量模型^[9]。这些模型都引起了广泛的关注和研究。

综上所述，全息暗能量模型和新 agegraphic 暗能量模型表现出暗能量基本理论的一些特征，而标量场模型被认为是暗能量基本理论的有效模型，那么用标量场模型描述具有量子引力理论重要性质的暗能量就成为大家感兴趣的研究方向。在文献[10]中重构了新 agegraphic 快子暗能量模型，但这篇文献只考虑暗能量和物质组成的宇宙，没有考虑辐射组分，并且使用的参数是旧的观测数据限制的结果^[11]，本文在考虑辐射的基础上参考最新数据限制的参数，重新探讨新 agegraphic 快子暗能量模型。

2. 新 Agegraphic 暗能量模型及其新初始条件

在新 agegraphic 暗能量模型中，暗能量的能量密度表示为

$$\rho_{de} = \frac{3n^2 M_{pl}^2}{\eta^2}, \quad (1)$$

其中 n 为无量纲的模型参数， M_{pl} 是约化普朗克质量， η 是宇宙共形时间，

$$\eta \equiv \int_0^t \frac{dt'}{a} = \int_0^a \frac{da'}{Ha'^2}, \quad (2)$$

上式中 a 是宇宙尺度因子， $H \equiv \dot{a}/a$ 是哈勃参数，字母上面的点表示对宇宙时间 t 求导数。对于平坦 Friedmann-Robertson-Walker 宇宙，Friedmann 方程表示为

$$H^2 = \frac{1}{3M_{pl}^2}(\rho_{de} + \rho_m + \rho_r), \quad (3)$$

ρ_{de} 、 ρ_m 和 ρ_r 分别表示暗能量、物质和辐射的能量密度。临界密度 $\rho_{crit} \equiv 3M_{pl}^2 H^2$ ，我们用 Ω_{de} 、 Ω_m 和 Ω_r 分别表示暗能量、物质和辐射的能量密度与临界密度的比率，Friedmann 方程亦可以写成

$$\Omega_{de} + \Omega_m + \Omega_r = 1. \quad (4)$$

我们根据(1)-(3)，以及能量守恒方程 $\dot{\rho}_m + 3H\rho_m = 0$ 和 $\dot{\rho}_r + 4H\rho_r = 0$ 可得到

$$\frac{d\Omega_{de}}{dz} = \frac{-\Omega_{de}}{1+z} (1 - \Omega_{de}) \left[3 + F(z) - \frac{2(1+z)}{n} \sqrt{\Omega_{de}} \right] \quad (5)$$

其中 $F(z) \equiv \frac{\Omega_{r0}(1+z)}{\Omega_{m0} + \Omega_{r0}(1+z)}$ ，下标中的“0”表示该物理量的当前值； $z = a^{-1} - 1$ 表示红移。再通过(1)、(2)，以及能量守恒方程 $\dot{\rho}_{de} + 3H(1+w_{de})\rho_{de} = 0$ 可以得到暗能量的状态方程

$$w_{de} = -1 + \frac{2(1+z)}{3n} \sqrt{\Omega_{de}}. \quad (6)$$

要解方程(5)除了需要有参数 n ，还要有一个初始条件 Ω_{de0} 。没有考虑辐射因素的情况下，文献[9]给出的初始条件为 $\Omega_{de0}(z_{ini}) = \frac{n^2(1+z_{ini})^{-2}}{4}$ ，

$z_{ini} = 2000$ ，那是由物质主导的时期，根据这个初始条件使新 agegraphic 暗能量模型由双参数模型变成一个单参数模型(参数 n)。本文考虑了辐射的影响，文献[12]为这种情况提供了新的初始条件形式

$$\Omega_{de}(z_{ini}) = \frac{n^2(1+z_{ini})^{-2}}{4} \left(1 + \sqrt{F(z_{ini})} \right)^2, \quad (7)$$

在这里仍然采用 $z_{ini} = 2000$ 。

$$F(z_{ini}) \equiv \frac{\Omega_{r0}(1+z_{ini})}{\Omega_{m0} + \Omega_{r0}(1+z_{ini})} \text{ 中}$$

$\Omega_{r0} = \Omega_{\gamma 0} (1 + 0.2271 N_{eff})$, N_{eff} 是中微子有效种类数, 其标准值为 3.04^[13],

$\Omega_{\gamma 0} = 2.469 \times 10^{-5} h^{-2}$ ($T_{cmb} = 2.725$ K) 是当前的光子密度, h 是无量纲哈勃常数。由公式(7)可知新初始条件比原来的初始条件多了一项 $(1 + \sqrt{F(z_{ini})})^2$ 。根据现有的参数计算, $(1 + \sqrt{F(z_{ini})})^2$ 项的值是 2.626, 也就是说新的初始条件比没有辐射项的原初始条件大 2.6 倍。可见, 辐射项对于初始条件是有一定影响的。

3. 新 Agegraphic 快子暗能量模型

快子场是动力学标量场的一种。快子场 ϕ 根据其快子势 $V(\phi)$ 的形式也可以作为暗能量的源。当势 $V(\phi)$ 足够平坦时, 快子场 ϕ 就可在其中慢滚, 可以产生足够的负压强, 因而可以用于描述暗能量。

考虑平坦 Friedmann-Robertson-Walker 宇宙, 快子场的能量密度和压强密度分别为

$$\rho_{\phi} = \frac{V(\phi)}{\sqrt{1-\dot{\phi}^2}}, \quad (8)$$

$$p_{\phi} = -V(\phi)\sqrt{1-\dot{\phi}^2}. \quad (9)$$

相应的, 我们可以得到快子场的状态方程参数为

$$w_{\phi} = p_{\phi}/\rho_{\phi} = \dot{\phi}^2 - 1, \quad (10)$$

从上式可以看出快子场的状态方程参数介于 -1 和 0 之间。势能曲线越平坦, 快子场滚动就越慢, 动能项 $\dot{\phi}^2$ 就越趋近于 0, 因而快子场表现出来的效果就越像一个宇宙学常数。可见, 快子势的形状非常重要, 决定了场的动力学演化。

既然要在快子场中表现新 agegraphic 暗能量的性质, 那么快子场中的能量密度 ρ_{ϕ} 就是新 agegraphic 暗能量的能量密度 ρ_{de} 。我们将以上三个公式中的下标 ϕ 都换成下标 de 。根据公式(3), 我们可以把 Friedmann 方程整理成

$$E = \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{r0}(1+z)^4}{1-\Omega_{de}}}. \quad (11)$$

在利用公式(8)、(9)和(11)将快子势重写

$$\frac{V(\phi)}{\rho_{c0}} = \Omega_{de} E^2 \sqrt{-w_{de}}, \quad (12)$$

上式中的 $\rho_{c0} = 3M_{pl}^2 H_0^2$ 是今天的宇宙临界密度。根据公式(10)和(11)得到快子标量场 ϕ 关于红移 z 的导数

$$\frac{\phi'}{H_0^{-1}} = \pm \frac{\sqrt{1+w_{de}}}{E(1+z)}, \quad (13)$$

这里的正负号是任意取的, 因为它可以通过对场重新定义 $\phi \rightarrow -\phi$ 而变换。然后, 如果假定在当前时期($z = 0$)场的值为 $\phi(0) = 0$, 那我们新 agegraphic 快子暗能量场随红移的演化方程

$$\phi(z) = \int_0^z \phi' dz. \quad (14)$$

由此我们就重构了新 agegraphic 快子标量场的势 $V(\phi)$ 及其场 $\phi(z)$ 的演化行为。在计算过程中, 求解 Ω_{de} 和 w_{de} 时采用初始条件

$$\Omega_{de}(z_{ini}) = \frac{n^2(1+z_{ini})^{-2}}{4} (1 + \sqrt{F(z_{ini})})^2, \text{ 其中}$$

$$F(z_{ini}) \equiv \frac{\Omega_{r0}(1+z_{ini})}{\Omega_{m0} + \Omega_{r0}(1+z_{ini})}, \quad z_{ini} = 2000. \text{ 文献[12]用}$$

557 个数据的 Ia 型超新星(SNIa)观测结果, 宇宙微波背景(CMB)的观测数据(来自威尔金森微波背景各向异性探测器(WMAP)7 年的观测), 以及重子声子振动(BAO)测量(来自斯隆数字巡天(SDSS)释放的数据)联合限制, 得到 1σ 内最佳拟合的参数:

$$n = 2.810_{-0.113}^{+0.113}, \quad h = 0.665_{-0.013}^{+0.013}, \quad \chi_{min}^2 = 577.451, \quad \Omega_{m0} = 0.268.$$

我们根据以上的参数拟合结果得出标量场的势对于不同 n 值以及不同 h 值的演化, 红移 z 的范围选在 0~20, 如图 1 和图 2。由这两个图可以看出标量场的势对哈勃常数 h 不敏感, 图 2 的曲线几乎是重合的。图 1 中标量场的势在早期($z > 2.9$)是比较陡峭的, 在近期是比较平坦的。图 3 是标量场在不同 n 值条件下随红移 z 的演化过程, 由于也对哈勃常数 h 不敏感, 就没有给出随 h 值不同的演化。图 4 是动能密度 $\dot{\phi}^2$ 作为标量场 ϕ 的函数, 它很接近线性关系, 而且随着 n 值增大, 曲线会变得稍微陡峭一些。从图 1 和图 2 中我们已经看到, 重构出来的势能曲线在场值大时(对应于高红移)比较陡峭, 在场值小时(对应于低红移)比较平坦。因此, 快子场在高红移时滚动较快, 而在低红移时可实现慢滚。我们从图 4 中印证了这一点——当场值较大时, 场的动能就比较大; 当场值较小时, 场的动能就变得较小; 二者之间的关系接近于线性。可见, 快子标量场实现了新 agegraphic 暗能量的

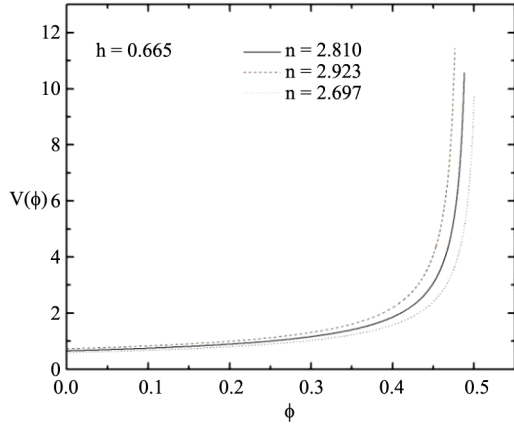


Figure 1. Tachyon potential of new agegraphic tachyon dark energy model with different value of n , where ϕ is in units of H_0^{-1} and $V(\phi)$ is in ρ_0

图 1. n 取不同值时新 agegraphic 快子暗能量模型的快子势。其中 ϕ 的单位是 H_0^{-1} , $V(\phi)$ 的单位是 ρ_0 。

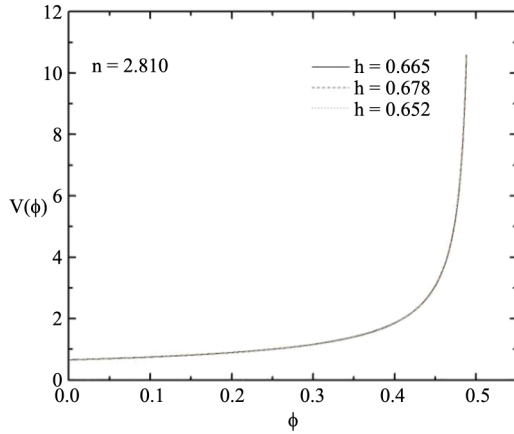


Figure 2. Tachyon potential of new agegraphic tachyon dark energy model with different value of h

图 2. h 取不同值时新 agegraphic 快子暗能量模型的快子势

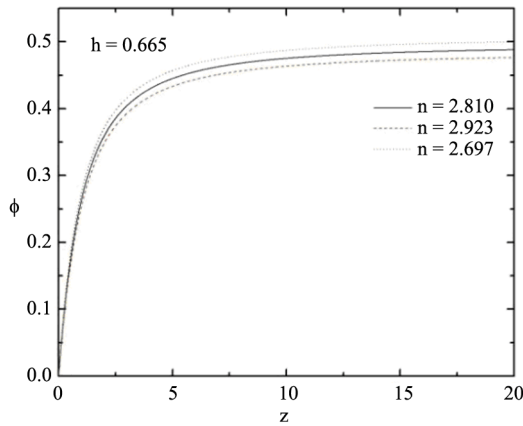


Figure 3. Dynamic evolution of scalar field in new agegraphic tachyon dark energy model

图 3. 新 agegraphic 快子暗能量模型标量场的动力学演化

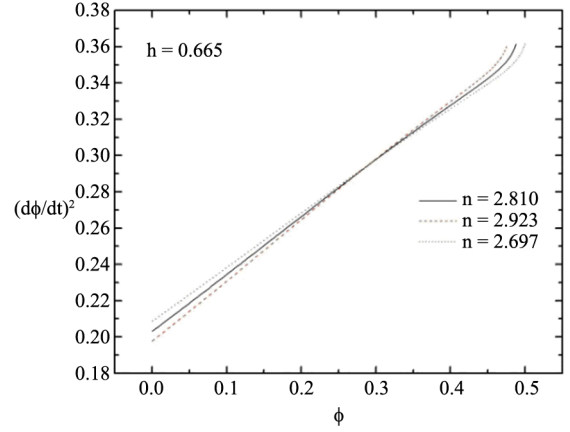


Figure 4. Dynamic evolution of kinetic energy density as a function of scalar field in new agegraphic tachyon dark energy model

图 4. 新 agegraphic 快子暗能量模型动能密度作为标量场 $\phi(z)$ 的函数的动力学演化

“冻结”特性——在早期状态参数 w_{de} 大于 -1 ，而在晚期 w_{de} 越来越趋近于 -1 ，最终会变成宇宙学常数。当其他参数固定时， n 值越大， w_{de} 在早期就越小，因而标量场的演化曲线就越平坦一些。从直觉上说，人们或许会认为， $\dot{\phi}^2$ 随 ϕ 的演化曲线会随着 n 值的增大而变得平缓。然而事实并不是这样。从图 4 中我们看到，事实上 $\dot{\phi}^2$ 随 ϕ 的演化曲线是随着 n 值的增大而变得稍微陡峭一些。其原因是，随着 n 值的不同， ϕ 场的演化规律也是不同的；从图 3 中我们看出， ϕ 场值相同时，不同的 n 值对应的红移是不同的。这种内在的复杂性反应到场的类似“相空间” $\dot{\phi}^2 - \phi$ 中就表现为 n 值越大，演化轨迹就越陡峭一些，与直觉正相反。

4. 结论

暗能量问题本质上是一个量子引力问题。新 agegraphic 暗能量模型是依据量子力学的不确定性关系和广义相对论中的引力效应提出的。同时，观测结果表明，驱动宇宙加速膨胀的暗能量可能是动力学演化的，动力学暗能量模型成为推动宇宙加速膨胀的候选者之一。动力学标量场被认为是暗能量基本理论的有效描述。我们在考虑辐射影响的基础上，通过标量场之一的快子场和新 agegraphic 暗能量的对应构造一个新 agegraphic 快子暗能量模型。参考来自 SNIa(557 个数据)、CMB 及 BAO 观测数据最新拟合的模型参数 n 、哈勃常数 h 和 Ω_{m0} ，重构出新 agegraphic 快子暗能量模型快子势 $V(\phi)$ 的演化曲线，以及快子场 $\phi(z)$ 和

暗能量模型动能密度 $\dot{\phi}^2$ 的动力学演化。

5. 致谢

本文的工作是由国家自然科学基金(11175042)支持的。

参考文献 (References)

- [1] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, et al. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astronomical Journal*, 1998, 116(3): 1009-1038.
- [2] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae. *Astrophysical Journal*, 1999, 517(2): 565-586.
- [3] P. J. E. Peebles, B. Ratra. Cosmology with a time variable cosmological constant. *Astrophysical Journal*, 1988, 325: L17.
- [4] R. R. Caldwell. A phantom menace. *Physics Letters B*, 2002, 545(1-2): 23-29.
- [5] A. Sen. Tachyon matter. *Journal of High Energy Physics*, 2002, 0207: 065.
- [6] B. Feng, X. L. Wang and X. M. Zhang. Dark energy constraints from the cosmic age and supernova. *Physics Letters B*, 2005, 607(1-2): 35-41.
- [7] M. Li. A model of holographic dark energy. *Physics Letters B*, 2004, 603(1-2): 1-5.
- [8] R. G. Cai. A dark energy model characterized by the age of the universe. *Physics Letters B*, 2007, 657(4-5): 228-231.
- [9] H. Wei, R. G. Cai. A new model of agegraphic dark energy. *Physics Letters B*, 2008, 660(3): 113-117.
- [10] J. L. Cui, L. Zhang, J. F. Zhang, et al. New agegraphic dark energy as a rolling tachyon. *Chinese Physics B*, 2010, 19(1): 019802.
- [11] H. Wei. Cosmological model and latest observational data. *European Physical Journal C*, 2009, 60(3): 449-455.
- [12] Y. H. Li, J. F. Zhang and X. Zhang. On initial condition of the new agegraphic dark energy model. *Chinese Physics B*, 2013, 22(3): 039501.
- [13] E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley, et al. Seven-year wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Cosmological interpretation. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, 192(2): 18.