

暗能量理论研究现状概述

A Brief Overview of Recent Theoretical Study on Dark Energy

韦浩/WEI Hao, 蔡荣根/CAI Rong-gen

中国科学院理论物理研究所,北京 100080

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

[摘要] 近年来的大量天文观测表明,我们的宇宙正在经历加速膨胀,为此,暗能量已经成为现代宇宙学研究的最活跃领域之一。对暗能量理论研究现状作了一个简要的概述。

[关键词] 暗能量,宇宙学 **[中图分类号]** O41

[文献标识码] A **[文章编号]** 1000-7857(2005)12-0028-05

Abstract: Recently, dark energy has been one of most active fields in modern cosmology since a lot of cosmological observations indicate that our universe is undergoing an accelerated expansion. In this article, a brief overview of the status of theoretical study on dark energy was given.

Key Words: dark energy, cosmology

CLC Number: O41

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)12-0028-05

1 引言

近年来,大量的天文观测(如 SNe Ia^[1-4]、WMAP^[5-6]、SDSS^[7-8]、Chandra X-ray Observatory^[9],等)表明,我们的宇宙是近似空间平坦的,正在经历加速膨胀。我们的宇宙包含大约 72% 的暗能量、22% 的暗物质、4% 的可见物质和可以忽略不计的辐射。

为驱动宇宙加速膨胀,暗能量的态方程参数(压强与能量密度之比)必须小于 $-1/3$ 。最简单的暗能量候选者是一个很小的正宇宙学常数,其态方程参数为常数 -1 。但很难理解为何宇宙学常数要比理论预期值——普朗克能量密度——大约小 120 个量级,这就是所谓的宇宙学常数问题(cosmological constant problem)。另一个与暗能量有关的问题是所谓的巧合性问题(coincidence problem),即为何暗能量密度和物质密度现在处于同一个量级。因为二者随宇宙时间的演化是如此不同,今天要想使它们处于同一量级,就必须在宇宙早期精调(fine-tune)暗能量密度到一个难以接受的程度。第三个与暗能量相关的问题是:暗能量到底是什么(the nature of dark energy problem)?它是一种奇

异的新物质形态吗?爱因斯坦引力需要修改吗?它真的是一个真正的宇宙学常数?最近几年暗能量问题已经成为现代宇宙学中最活跃和最重要的研究领域之一^[10-17]。

本文试图对暗能量理论研究现状作一个简要的概述。根据文献^[16,17],我们将这些暗能量理论分为以下几大类(参看图 1):观测数据的其它解释;修改广义相对论引力理论;动力学暗能量;宇宙不均匀性;宇宙学常数。

事实上,以上这些分类并不是绝对的。在某些情况下,它们之间存在关联。我们作这样的分类只是为了叙述的方便和简洁。在文献中,亦可见到其它分类方法。

2 暗能量理论概述

2.1 观测数据的其它解释

对于宇宙加速膨胀,最直接的观测证据来自于对 Ia 型超新星(SNe Ia)的观测。这类超新星可以作为标准烛光。人们发现在遥远的(红移在 0 到 2 之间)Ia 型超新星的亮度比原来预期的要

收稿日期:2005-11-09

基金项目:国家自然科学基金杰出青年基金项目(10325525)、国家自然科学基金项目(90403029)、国家重点基础研究发展计划项目(TG1999075401)

作者简介:韦浩,男,北京市海淀区中关村东路 55 号中国科学院理论物理研究所,博士生,主要研究方向为宇宙学;E-mail: haowei@itp.ac.cn

蔡荣根,男,中国科学院理论物理研究所,研究员,主要研究方向为引力理论和宇宙学;E-mail: cairg@itp.ac.cn

[5] LEE T D, YANG C N. Phys Rev[J]. 1956:104 254 .

[6] YANG C N, MILLS R L. Phys Rev[J]. 1954(96): 191.

[7] GROSS D J, WILCZEK F. Phys Rev Lett [J]. 1973 (30):1 343; Polizer H D, Phys Rev Lett[J]. 1973(30): 1 346.

[8] t' HOOFT G, VVLTMAN M. Nucl Phys[J]. 1972(B50):318.

[9] GEORGI H, QUINN H R, WEINBERG S, Phys Rev Lett [J]. 1974 (33): 451.

[10] PARTI J, SALAM A. Phys Rev Lett[J]. 1973:31 275 .

[11] GEORGI H, GLASHOW S L. Phys Rev Lett[J]. 1974(32): 438.

[12] GEORGI H. Particles and Fields-1974 [C], Ed. Carlson C. New

York: Amer. Inst. of Physics, 1975.

[13] FRITZSCH H, MINKOWSKI P. Ann Phys[J]. 1975(93): 193.

[14] CHOU K C, WU Y L. Science in China, 1998(A41):324.

[15] LEE T D, Phys, Rev[J]. 1973(D8): 1 226.

[16] Wu Y L, WOLFENSTEIN L. Phys Rev Lett [J]. 1994 (73): 1 762; WOLFENSTEIN L, Wu Y L. Phys Rev Lett[J]. 1994(73): 2 809.

[17] Dai Y B, Wu Y L. Eur Phys J C (DOI) 10.1140/epjcd/s2004-01-001-3, hep-ph/0304075.

[18] COLEMAN S, MANDULA J. Phys Rev[J]. 1967(159): 1 251.

(责任编辑 胡春华)

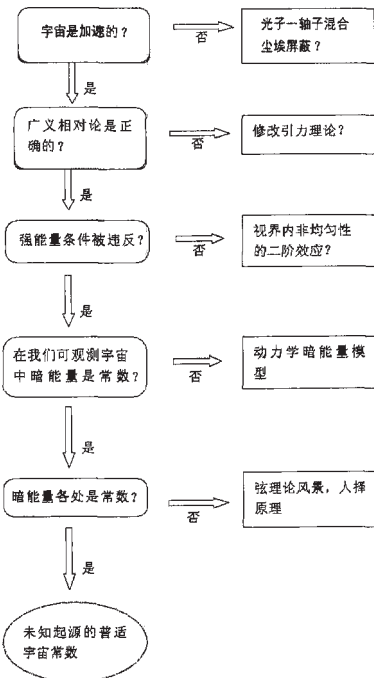


图 1 暗能量理论分类^[16,17]

暗。这意味着这些超新星距离我们比原来大爆炸模型所预言的要远。也就是说,我们的宇宙并不处于原来大爆炸模型预言的减速膨胀,而是在加速膨胀中。

为解释宇宙加速膨胀,通常人们会引入一个负压的暗能量。但人们首先有理由深入考察 Ia 型超新星的亮度比原来预期的要暗,暗能量的引入并不是必须的。这些年,人们提出了一些不需要引入暗能量来解释超新星亮度变暗的机制,如灰色尘埃(gray dust)^[18-19]、光子轴子转换^[20-22]、光度演化(luminosity evolution)^[23]等。不过,近年来精度越来越高的超新星观测及其它天文观测如微波背景涨落、大尺度结构等已经大大压缩了这类解释的生存空间。

2.2 修改引力理论

如果宇宙加速膨胀是真实的,它到底是意味着宇宙中存在一种新的奇异的物质形态(暗能量),还是意味着广义相对论在大尺度上应该修改?对于后者,目前绝大多数广义相对论的实验检验确实都是在地球上或太阳系范围内进行的。人们有理由怀疑广义相对论在宇宙尺度上是否有效,因为没有人检验过。也许宇宙加速膨胀正是引力理论在宇宙尺度上应该修改的证据。

对广义相对论进行修改有很长的历史,如在广义相对论中引入一标量场,构成所谓的 Brans-Dicke 理论。在这一理论中,标量场能够担当暗能量的角色。最近一个比较有趣的建议是 Carroll 等人提出的^[24,25]。他们考虑了在引力作用量中加入形如 R^{-1} 的对爱因斯坦希伯特作用量的修正项。当宇宙的曲率趋于很小时,这样的项将会导致宇宙的加速膨胀。但遗憾的是,这样的理论被证明是不稳定的,也与现在的太阳系观测不相容。Nojiri 和 Odintsov 等人^[26]还考虑了形如 $\ln(R)$ 的修正项。后来,人们把这类理论推广为 $f(R)$ 理论(见[27~29]及其参考文献),它可以包含任意 R 的修正项。国内苏汝铿、王斌等^[30]和孟新河、王鹏等^[31,32]在这方面也开展了一些研究工作。除了可以在作用量中加入 R 的修正项,还可以考虑加入形如 $R^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$ 或 $R^{\mu\nu\alpha\beta}R_{\mu\nu\alpha\beta}$ 之类的修正项。四阶曲率的一个特别组合,即 Gauss-Bonnet 项是人们研究比较多的,因为 Gauss-Bonnet 项在四维时空中是一拓扑不变量,因此在这些模型中通常有一标量场与 Gauss-Bonnet 项存在耦合。人们相信这些耦合在超弦理论的低能近似中会出现(见[33]及其参考文献)。

另一类修改爱因斯坦引力的方案是膜世界图像(brane world scenario)。在这类方案中一般采用高维时空。我们现实的四维世界被禁闭在一张膜上,只有引力可以在额外维中传播。因为引力可以“泄漏”到额外维,相应地在膜上的引力得到了修改。最早的

方案是 ADD 膜世界^[34,35],随后提出 RSI^[36]和 RSII^[37]膜世界以及 DGP 膜世界^[38]。关于膜世界引力理论,可以参见综述文献^[39-41]。在膜世界图像的暗能量模型中,非常有趣的是 DGP 模型,在这个模型里,宇宙在晚期自然是加速膨胀的^[42-46]。如果在膜和体(bulk)之间存在能量和物质交换,膜宇宙在晚期也能加速膨胀,并与观测相一致,最近的文献见[47]。

受以上这些工作的启发,人们也提出了另一种修改引力的唯象模型:Cardassian 暗能量^[48-49]。Cardassian 暗能量模型通过直接修改 Friedmann 方程来修改引力,可以使得晚期宇宙加速膨胀。除了以上修改引力理论外,当然,还有许许多多的修改方式,如快子凝聚等,这里不再一一列出。

2.3 动力学暗能量

在这一类模型里,暗能量是由动力学场提供的。在暗能量研究中,许多模型属于这一类。人们引入动力学暗能量模型的目的之一是希望能解决暗能量的巧合性问题。

2.3.1 实标量场暗能量

在暗能量理论研究中,因为简单性,标量场暗能量模型具有很大的吸引力。目前许多暗能量模型都采用标量场来描述。

最著名的标量场暗能量模型是 quintessence (有人译为“精质”)^[50-52]。它是一个正则实标量场,在均匀、各向同性的宇宙模型中,其拉氏量密度为(本文使用自然单位,度规约定为一正三负):

$$L_{DE} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

其中一点表示对宇宙时间求导。由这个拉氏量密度出发,容易得到 quintessence 的压强和能量密度,分别为:

$$p_{\phi} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad \rho_{\phi} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi).$$

相应的态方程参数为:

$$w_{\phi} \equiv p_{\phi} / \rho_{\phi} = \frac{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

显然,quintessence 的态方程参数介于 -1 和 +1 之间。当 quintessence 沿着较平缓的势向下滚动时,其态方程参数可以小于 -1/3,从而驱动宇宙加速膨胀。而且,它甚至可以很接近于 -1,模仿一个宇宙学常数。当取某一类特别势的时候,quintessence 模型可以具有 scaling(标度)解或者 tracker(追踪)解^[53,54]。此时 quintessence 的能量密度追随背景物质的能量密度演化。由于吸引子的存在,使得模型的宇宙学演化不依赖于初始条件,这样可以缓和巧合性问题。

由于观测数据不能排除态方程参数小于 -1,quintessence 模型显然难以满足这一要求,人们于是提出了一种所谓的 phantom (有人译为“幽灵”)暗能量模型^[55]。在这一模型中,暗能量的态方程参数小于 -1。实现 phantom 暗能量最容易的方式是某一标量场具有一个“错误的”动能项,其拉氏量密度可写为:

$$L_{DE} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

相应的压强和能量密度分别为:

$$p_{\phi} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi), \quad \rho_{\phi} = -\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi).$$

相应的态方程参数为:

$$w_{\phi} \equiv p_{\phi} / \rho_{\phi} = \frac{-\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)}{-\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi)}$$

显然,phantom 的态方程参数总是小于-1 的。由于它违反所有的能量条件,在这个模型里会有一些不希望的性质,如不稳定性^[56-58]。另外,在 phantom 暗能量模型里,它的能量密度随时间演化非但不减小,反而增加。因此,宇宙的膨胀将是越来越快,最后宇宙的命运是 Big Rip(大撕裂)。所以在这一暗能量模型中,我们宇宙的命运是有限的。

第三种标量场暗能量模型是 k-essence (有人译为“动能精质”)^[59-61]。它是一种非正则标量场,可以包含非线性动能项。其拉氏量密度可以为任意 ϕ 和动能项 $X \equiv \frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi$ 的函数 $p(\phi, X)$ 。相应的压强也就是这个 $p(\phi, X)$, 能量密度 $\rho=2X_{p,s}p$ (其中下标 X 表示对 X 求导)。取适当的 $p(\phi, X)$ 形式, k-essence 模型也可以有 scaling 解。同样,由于吸引子的存在,使得模型的宇宙学演化不依赖于初始条件,以这种方式缓和巧合性问题。

值得指出的是, tachyon (快子) 的拉氏量密度具有形式 $\frac{V(\phi)}{\sqrt{1-X}}$, 它可以被看作 k-essence 的一种特殊形式。人们也研究过 Tachyon 作为暗能量的可能候选者, 关于此可参见最近的文献^[62, 63]及其参考文献。

2.3.2 复标量场与矢量场暗能量

下面介绍两类不是很流行的暗能量模型,暗能量分别由复标量场和矢量场来提供。正则复标量场作为暗能量时被称为 spintessence^[64-67], 其拉氏量密度为:

$$L_{DE} = \frac{1}{2}(\partial^\mu\Phi^*)(\partial_\mu\Phi) - V(|\Phi|),$$

其中 $|\Phi|^2 = \Phi^*\Phi$ 为此正则复标量场的幅度平方。由于 spintessence 会遇到 Q-ball 形成的问题(暗能量成团, 而观测表明暗能量在宇宙学尺度上是均匀分布的), 所以它往往不能作为可行的暗能量模型, 而 Q-ball 作为暗物质是一可行的候选者。第二种考虑的是正则复标量场的模型, 如文献^[68]。它将宇宙极早期的 inflation (暴胀) 和当前的宇宙加速膨胀合在一起。此正则复标量场的实部和虚部分别充当 inflaton (暴胀子) 和暗能量。在文献^[69, 70], 我们也提出了一种名为 hessence 的非正则复标量场作为暗能量的可能候选者; 在第 3 节我们会再次提到 hessence 模型; 最后我们提到一种极其罕见的暗能量模型, 它使用矢量场提供暗能量^[71]。由于矢量场的特殊性和复杂性, 这类模型会遇到和标量场暗能量不同的困难, 如各向异性等。

2.3.3 Chaplygin 气体

Chaplygin 气体^[72-76]也是很常见的暗能量候选者。原始版本的 Chaplygin 气体是一种奇异的流体, 由态方程

$$p = -\frac{A}{\rho}$$

描述。其中 A 为一正的常数。代入连续性方程

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + p) = 0$$

容易得到:

$$\rho = \sqrt{A + \frac{B}{\alpha}}$$

其中 B 为积分常数。可以看出在宇宙早期, Chaplygin 气体表现得像物质; 在宇宙晚期, 它表现得像宇宙学常数。所以, Chaplygin 气体往往被视为暗能量和暗物质的统一模型。后来它被推广到所谓的 generalized Chaplygin 气体, 其态方程为:

$$p = -\frac{A}{\rho^\alpha}$$

这里 α 为小于 1 的常数。代入连续性方程, 得到:

$$\rho = \left[A + \sqrt{\frac{B}{\alpha^{1/(1+\alpha)}}} \right]^{1/(1+\alpha)}$$

这是目前研究得较多的 Chaplygin 气体模型。

最近, 人们又提出了一些新的 Chaplygin 气体模型。我们介绍其中几种。在文献^[77, 78], 提出了所谓的 Modified Chaplygin 气体。它的态方程为:

$$p = -\frac{1}{1+\alpha} \left[\alpha\rho + \frac{A}{\rho} \right]$$

在以上各种 Chaplygin 气体模型中, A 均为常数。在文献^[79], 郭宗宽、张元仲等提出了 Variable Chaplygin 气体模型, 其态方程为:

$$p = -\frac{A(\alpha)}{\rho}$$

其中 $A(\alpha) = A_0\alpha^{-n}$ 不再是常数。此后, 孟新河等^[80]把它推广为所谓 extended Chaplygin 气体, 即:

$$p = -\frac{A(\alpha)}{\rho^\alpha}$$

这些推广的模型有一些有趣的性质, 但其物理的动机不是非常清楚。

2.3.4 全息暗能量

全息原理被认为是量子引力的基本原理之一, 已经得到广泛认同。关于全息原理, 可参见综述文献^[81]。在过去几年里, 有若干人企图将全息原理应用到宇宙学中。最近的一个重要进展是全息暗能量的提出。在文献^[82-85], 李森等率先提出了可以使宇宙加速膨胀的全息暗能量模型。从全息原理出发, 得到全息暗能量的能量密度为:

$$\rho_\Lambda = 3c^2 M_p^2 L^{-2}$$

其中 c 为常数, M_p 为约化普朗克质量。若取红外截断 L 为未来事件视界 (future event horizon), 可以得到正确的小于 -1/3 的态方程参数, 以使宇宙加速膨胀。自 2004 年春提出全息暗能量模型至今, 人们投入了极大的研究热情, 探讨这一模型的相关性质, 并将这一模型推广到许多情形。

2.3.5 衰变的宇宙学常数 (decaying Lambda)

这是一种历史悠久的方案, 是 20 多年前为了理解为何宇宙学常数几乎为零(称为“旧的宇宙学常数问题”)而提出的。在这一模型中, 宇宙学“常数”可以随时间变化。有时称为 $\Lambda(t)$ CDM 模型。常见的变化宇宙学“常数”包括以下几种: $\Lambda \propto H^2$; $\Lambda \propto 1/R^2$; $\Lambda \propto \alpha/\alpha$; $\Lambda \propto \rho_m$ 或 $d\Lambda/dz \propto dH^2/dz$ 等。相关的讨论见综述文献^[86-88]。

关于动力学暗能量的研究, 许多研究者做了非常多的工作, 充分体现了理论物理学家的丰富想象力。限于篇幅, 在此我们就不一一介绍了。

2.4 宇宙的不均匀性

宇宙学原理认为我们的宇宙在大尺度上是均匀各向同性的。这确与观测相符。但很明显, 我们的宇宙在星系团尺度以下是不均匀的。另一方面, 在可观测宇宙以外, 我们不必保证宇宙也是均匀各向同性的。如果考虑宇宙的这些不均匀性, 有可能解释我们观测到的宇宙为何加速膨胀? 这是一个很有趣的想法。2005 年 3 月, 文献^[89, 90]的工作引起了相当大反响。他们认为原初暴胀产生的超视界扰动会导致视界内宇宙的不均匀, 从而使得晚期宇宙发生加速膨胀, 但随后的研究表明这种可能性很小。不久, 文献^[89]的作者提出视界内的不均匀的反作用有可能导致宇宙的加速膨胀。这些思想提出来后, 大量的研究随之而来, 相关的讨论至今仍然在持续, 支持和反对的声音不绝于耳。不管怎样, 这是一个值得进一步研究的方向。

2.5 宇宙学常数

如果以上各种各样的暗能量模型都被观测所排除, 那么人们将不得不面对一个不为零但又非常小的真正的宇宙学常数; 特别

是目前几乎所有的宇宙学观测都与宇宙学常数相容,甚至很偏好于这一宇宙学常数。无疑,宇宙学常数是一个多少有些无奈的,但又是简单和具有明显物理起源的选择。人们一直努力理解为何宇宙学常数如此之小甚至为零,但很多努力都被证明是徒劳无功的。文献[91,92]很好地综述了相关研究和各种企图。如果人们被迫接受这样无奈的选择,我们要么只能期待更基本的理论发现,要么只能求助于人择原理或者弦论的“风景”(landscape),即宇宙有多个真空,每个真空的宇宙学常数不同,我们所在的真空宇宙学常数之所以如此小,是因为若非如此人类就不可能存在了。最近弦理论的发展似乎有这一趋势。弦理论告诉我们,弦理论的真空有 10^{100} 甚至 10^{500} 多个,我们所在的宇宙仅是其中之一。我们生活在宇宙学常数如此小的宇宙是出于偶然?还是有意安排的?

3 暗能量其它相关问题的研究

上一节我们大致介绍了目前研究较多的暗能量模型,在本节中,我们将粗略提到关于暗能量研究中一些相关的其它问题。受本文作者的研究兴趣和视角所限,以下谈论的问题并不能在广度和深度上覆盖全面,仅仅表达我们的个人兴趣和观点。

关于暗能量,目前研究的一个问题是考虑暗能量与物质的相互作用。因为第五种力和等效原理很紧的观测约束,一般不考虑暗能量与重子的相互作用,只考虑与暗物质的相互作用。这方面的研究已经有较长的历史。Quintessence、phantom、k-essence、Chaplygin gas、全息暗能量与物质的相互作用等都有人进行过研究。其中,吸引力行为导致的 scaling 解占据了很重要的位置。对 Quintessence 与物质的相互作用研究得最早也最深入。Amendola 在这方面作了很多工作,在文献[93~99]中我们列出了其中一部分,有兴趣的读者可以从这些文献出发找到这方面研究的相关工作。值得指出的是,如果考虑一类特殊的 quintessence 与物质(包括重子)的相互作用(可以起源于标量张量理论或弦论),quintessence 的质量会随着周围物质密度而变化。所以,这种方案被称为“变色龙”(chameleon)^[100-104]。在宇宙中物质密度很低,其质量就很小;在地球或太阳系等物质密度很大的地方,其质量就很大。质量越大,力程越短。这样,在地球或太阳系范围内的第五种力和等效原理的实验就无法观测到它。这是一种很有趣的方案。在 phantom 暗能量模型中,如果没有与物质的相互作用,phantom 能量密度随时间增加;当有相互作用时,phantom 暗能量可以衰变成暗物质,从而暗物质和暗能量可以获得某种平衡。Phantom 与物质以相同的方式衰减,从而得到 scaling 解,缓和了巧合性问题,也避免了宇宙大撕裂的命运。在这方面,国内的郭宗宽、张元仲、蔡荣根、余洪伟等都有相关工作^[105-108]。相对来说,k-essence 与物质相互作用的工作要少得多。在这方面,我们考虑 k-essence 通过 chameleon 机制与物质相互作用,提出了一种 k-chameleon 模型^[109]。Chaplygin 气体通常是作为暗能量和暗物质的统一描述,也就是说没有通常假定的其它暗物质存在,在这种情况下考虑 Chaplygin 气体和暗物质相互作用是没有基础的。但 2005 年以来,很多观测数据拟合并不支持 Chaplygin 气体作为暗能量和暗物质的统一描述。因此,现在人们开始倾向于仅仅把 Chaplygin 气体作为暗能量的候选者(见[110]及其参考文献),同时考虑其它暗物质的存在。这时,考虑 Chaplygin 气体和暗物质的相互作用是有意义的。张宏升、朱宗宏在文献[111]中就考虑了这样一类 Chaplygin 气体和暗物质相互作用的模型。关于全息暗能量,在李淼的原始版本中,取截断 L 为未来事件视界,才可以得到宇宙加速膨胀;若取为哈勃半径则宇宙膨胀是减速的。如果考虑了全息暗能量与物质的相互作用,取截断 L 为哈勃半径时即可以得到加速膨胀^[112]。国内王斌、龚云贵等考虑了全息暗能量与物质的相互作用,同时取截断 L 为未来事件视界^[113]。关于暗能量与物质相互作用的工作很多,其中一个重要的方面是考虑暗能量和中微子

的相互作用,国内张新民等开展了一些非常有意义的相关研究。

另一个令人关注的是暗能量态方程参数穿过-1的问题。最近的观测数据拟合结果[114~118]略微偏好暗能量态方程参数在红移小于 0.2 左右穿过(现在常称为 phantom divide)。在这方面有很多工作,我们这里只提到其中的一部分。显然,最常见的暗能量候选者 quintessence 和 phantom 都无法单独实现态方程参数穿过-1,必须考虑其它方案才有可能。而文献[119]表明,k-essence 类的暗能量模型也很难实现态方程参数穿过,因为会出现无法接受的非物理结果。目前人们已经提出了若干方案以实现态方程参数穿过-1。国内张新民、冯波等提出了称为 quintom(他们称为“精灵”)^[118,120-122]的模型,这是 quintessence 和 phantom 混合的双场模型。我们也提出了一种非正则复标量场的单场模型,称为 hessence^[69,70]。在全息暗能量方案中,王斌、龚云贵等^[113]和张鑫等^[123,124]也发现了态方程参数可以穿过-1。如果考虑单个实标量场但具有二阶微分动能项,李明哲、冯波、张新民等^[125]证明它可以等效于一个双场的 quintom 模型。在标量张量理论中也可以实现态方程参数穿过-1^[126,127]。在膜世界或弦论中也同样发现可以做到这点[42~46,128,129]。此外还有很多可以实现态方程参数穿过-1的模型,如黄超光和郭汉英的工作^[130]、张扬等的工作^[131],限于篇幅,就不一一讨论。

其它与暗能量相关的理论问题还包括暗能量对于结构形成的影响、早期加速膨胀(暴胀)与晚期加速膨胀的统一描述、暗能量结团的可能性、暗能量模型的甄别等等。由于本文作者研究兴趣和能力所限,在此不作进一步讨论。

4 结论

在本文中,我们尽力展现了当前暗能量理论研究领域的概况。在浩瀚的文献中,我们仅仅介绍了暗能量理论研究的一些主要方面。由于我们的疏忽而没有提到的相关工作,在此我们谨向这些作者表示诚挚的歉意。

自从 1998 年宇宙加速膨胀被发现以来,暗能量的研究就一直是现代宇宙学研究的重要领域。2003 年 WMAP 的第一批数据及随后 SDSS 的第一批数据的发布,进一步确认了暗能量的存在,并且把暗能量研究推到了一个新的高度。人们正在等待下一代观测(例如 SNAP, Planck, JDEM project 等),期望由此能够更精确地确定宇宙学参数,能够理解暗能量的本质。

暗能量研究正处于方兴未艾的阶段,它的进一步发展无疑会对宇宙学和理论物理的发展起到极其重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] RIESS A G., et al. *Astrophys. J*[J]. 2004,607:665.
- [2] KNOP R A, et al. *Astrophys. J*[J]. 2003, 598:102.
- [3] RIESS A G, et al. *Astron. J*[J]. 1998, 116:1009.
- [4] PERLMUTTER S, et al. *Astrophys. J*[J]. 1999, 517:565.
- [5] BENNETT C L, et al. *Astrophys. J. Suppl*[J]. 2003, 148:1.
- [6] SPERGEL D N, et al. *Astrophys. J. Suppl*[J]. 2003, 148:175.
- [7] TEGMARK M, et al. *Phys. Rev. [J]* 2004, D69:103501.
- [8] TEGMARK M, et al. *Astrophys. J*[J]. 2004, 606:702.
- [9] ALLEN S W, et al. *Mon.Not.Roy.Astron.Soc*[J]. 2004, 353:457.
- [10] PEEBLES P J E, RATRA B. *Rev.Mod.Phys*[J]. 2003, 75:559.
- [11] PADMANABHAN T. *Phys.Rept*[J]. 2003, 380:235.
- [12] CARROLL S M. *Living Rev.Rel*[J]. 2001, 4:1.
- [13] SAHNI V, STAROBINSKY A A. *Int.J.Mod.Phys*[J]. 2000, D9:373.
- [14] PADMANABHAN T. 2004, astro-ph/0411044.
- [15] 蔡荣根. 德西特时空和暗能量[J]. *物理*, 2005, 34(8): 555.
- [16] CARROLL S M. 2003, astro-ph/0310342.
- [17] BEAN R, CARROLL S., TRODDEN M. 2005, astro-ph/0510059.
- [18] AGUIRRE A N. *Astrophys. J*[J]. 1999, 512:L19.

- [19] AGUIRRE A N. *Astrophys.J*[J]. 1999, 525:583.
- [20] CSAKI C, et al. *Phys.Rev.Lett*[J]. 2002, 88:161 302.
- [21] CSAKI C, et al. *Phys.Lett*[J]. 2002, B535:33.
- [22] CSAKI C, et al. *Annals Phys*[J]. 2005, 317:410.
- [23] DRELL P S, et al. *Astrophys.J*[J]. 2000, 530:593.
- [24] CARROLL S M, et al. *Phys.Rev*[J]. 2004, D70:043528.
- [25] CARROLL S M, et al. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71:063513.
- [26] NOJIRI S, ODINTSOV S D. *Gen.Rel.Grav*[J]. 2004, 36:1 765.
- [27] OLMO G J. 2005, gr-qc/0505101.
- [28] OLMO G J. 2005, gr-qc/0505135.
- [29] OLMO G J. 2005, gr-qc/0505136.
- [30] SHAO C G, SHEN J Y, WANG B, SU R K. 2005, gr-qc/0508030.
- [31] MENG X H, WANG P. *Gen.Rel.Grav*[J]. 2004, 36:1947.
- [32] MENG X H, WANG P. *Class.Quant.Grav*[J]. 2003, 20: 4 949.
- [33] AMENDOLA L, et al. 2005, hep-th/0506137.
- [34] ARKANI-HAMED N, et al. *Phys.Lett*[J]. 1998, B429: 263.
- [35] ANTONIADIS I, et al. *Phys.Lett*[J]. 1998, B436 : 257.
- [36] RANDALL L, SUNDRUM R. *Phys.Rev.Lett*[J]. 1999, 83: 4 690.
- [37] RANDALL L, SUNDRUM R. *Phys.Rev.Lett*[J]. 1999, 83: 3 370.
- [38] DVALI G, et al. *Phys.Lett*[J]. 2000, B485:208.
- [39] MAARTENS R. *Living Rev*[J]. *Rel.* 2004, 7:7.
- [40] BRAX P, et al. *Rept.Prog.Phys*[J]. 2004, 67: 2 183.
- [41] LUE A. 2005. astro-ph/0510068.
- [42] SAHNI V, SHTANOV Y. *JCAP*. 2003, 0311: 014.
- [43] CAI R G, ZHANG H S, WANG A. *Comm. Theor. Phys*[J]. 2005, 44:948.
- [44] SAHNI V. 2005, astro-ph/0502032.
- [45] CHARMOUSIS C, DUFAUX J-F. *Class.Quant.Grav*[J]. 2002, 19: 4 671.
- [46] NOJIRI S, et al. *Phys. Rev*[J]. 2005, D71: 123 509.
- [47] KOFINAS G, et al. 2005, hep-th/0510207.
- [48] FREESE K, LEWIS M. *Phys.Lett*[J]. 2002, B540: 1.
- [49] FREESE K. *New Astron. Rev*[J]. 2005, 49:103.
- [50] CALDWELL R R, et al. *Phys.Rev.Lett*[J]. 1998, 80: 1 582.
- [51] WETTERICH C. *Nucl. Phys*[J]. 1988, B302:668.
- [52] PEEBLES P J E. *RATRA B. Astrophys. J*[J]. 1988, 325:L17.
- [53] STEINHARDT P J, et al. *Phys.Rev*[J]. 1999, D59: 123 504.
- [54] ZLATEV I, Steinhart P J. *Phys.Lett*[J]. 1999, B459:570.
- [55] CALDWELL R R. *Phys.Lett*[J]. 2002, B545:23.
- [56] CALDWELL R R, et al. *Phys.Rev.Lett*[J]. 2003, 91:071301.
- [57] CARROLL S M, et al. *Phys.Rev*[J]. 2003, D68:023509.
- [58] CLINE J M, et al. *Phys.Rev*[J]. 2004, D70:043543.
- [59] ARMENDARIZ-PICON C, et al. *Phys.Rev.Lett*[J]. 2000, 85:4 438.
- [60] ARMENDARIZ-PICON C, et al. *Phys.Rev*[J]. 2001, D63: 103 510.
- [61] CHIBA T, et al. *Phys.Rev*[J]. 2000, D62: 023511.
- [62] LI X Z, et al. *Chin. Phys. Lett*[J]. 2002, 19: 1 584.
- [63] COPELAND E J, et al. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71: 043003.
- [64] BOYLE L A., et al. *Phys.Lett*[J]. 2002, B545:17.
- [65] GU J A, HWANG W Y. *Phys.Lett*[J]. 2001, B517:1.
- [66] KASUYA S. *Phys.Lett*[J]. 2001, B515:121.
- [67] GAO C J, SHEN Y G. *Phys. Lett*[J]. B 541:1.
- [68] ZHAI X H, ZHAO Y B. 2005, gr-qc/0508069.
- [69] WEI H, CAI R G, ZENG D F. *Class. Quant. Grav*[J]. 2005, 22: 3 189.
- [70] WEI H, CAI R G. 2005, astro-ph/0509328.
- [71] C ARMENDARIZ-PICON, *JCAP*. 2004, 0407:007.
- [72] KAMENSHCHIK A Y, et al. *Phys.Lett*[J]. 2001, B511:265.
- [73] BILIC N, et al. *Phys. Lett*[J]. 2002, B535:17.
- [74] BENTO M C, et al. *Phys.Rev*[J]. 2002, D66:043507.
- [75] BERTOLAMI O. 2004, astro-ph/0403310.
- [76] GORINI V, et al. 2004, gr-qc/0403062.
- [77] CHIMENTO L P, LAZKOZ R. 2005, astro-ph/0505254.
- [78] CHIMENTO L P. *Phys.Rev*[J]. 2004, D69: 123 517.
- [79] GUO Z K, ZHANG Y Z. 2005, astro-ph/0506091.
- [80] MENG X H. preprinted al, 2005, astro-ph/0510357.
- [81] BOUSSO R. *Rev. Mod. Phys*[J]. 2002, 74: 825.
- [82] LI M. *Phys.Lett*[J]. 2004, B603:1.
- [83] HUANG Q G, LI M. *JCAP*, 2004, 0408:013.
- [84] KE K, LI M. *Phys.Lett*[J]. 2005, B606:173.
- [85] HUANG Q G, LI M. *JCAP*, 2005, 0503:001.
- [86] OVERDUIN J M, COOPERSTOCK F I. *Phys.Rev* [J]. 1998, D58: 043506.
- [87] OVERDUIN J M, WESSON P S. *Phys.Rept*[J]. 2004, 402:267.
- [88] WANG P, MENG X H. *Class. Quant. Grav*[J]. 2005, 22 :283.
- [89] KOLB E W, et al. 2005, hep-th/0503117.
- [90] WILTSHIRE D L. 2005, gr-qc/0503099.
- [91] WEINBERG S. *Rev. Mod.Phys.* 1989, 61:1.
- [92] NOBBENHUIS S. 2004, gr-qc/0411093.
- [93] AMENDOLA L. *Phys.Rev*[J]. 2000, D62: 043511.
- [94] AMENDOLA L, TOCCHINI-VALENTINI, D. *Phys.Rev* [J]. 2001, D64:043509.
- [95] AMENDOLA L, TOCCHINI-VALENTINI, D. *Phys.Rev* [J]. 2002, D66:043528.
- [96] AMENDOLA L, QUERCELLINI C. *Phys. Rev* [J]. 2003, D68: 023514.
- [97] AMENDOLA L. *Phys.Rev*[J]. 2004, D69:103 524.
- [98] AMENDOLA L. *Phys.Rev.Lett*[J]. 2004, 93:181 102.
- [99] AMENDOLA L, et al. *Astrophys.J*[J]. 2003, 583:L53.
- [100] KHOURY J, WELTMAN A. *Phys.Rev.Lett*[J]. 2004, 93:171 104.
- [101] KHOURY J, WELTMAN A. *Phys.Rev*[J]. 2004, D69: 044026.
- [102] BRAX P, et al. *Phys.Rev*[J]., 2004, D70:123 518.
- [103] GUBSER S, KHOURY J. *Phys.Rev* [J]. 2004, D70:104 001.
- [104] NOJIRI S, ODINTSOV S D. *Mod.Phys.Lett*[J]. 2004, A19:1 273.
- [105] GUO Z K, ZHANG Y Z. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71:023501.
- [106] GUO Z K, CAI R G, ZHANG Y Z. *JCAP*, 2005, 0505:002.
- [107] CAI R G, WANG A.Z. *JCAP*, 2005, 0503:002.
- [108] WU P X, YU H W. *Nucl. Phys*[J]. 2005, B727:355.
- [109] WEI H, CAI R G. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71:043504.
- [110] SEN A A, SCHERRER R J. *Phys.Rev*[J]. 2005, D72:063511.
- [111] ZHANG H S, ZHU Z H. 2005, astro-ph/0509895.
- [112] PAVON D, ZIMDAHL W. 2005, gr-qc/0505020.
- [113] WANG B, GONG Y G, ABDALLA E. *Phys.Lett* [J]. 2005, B624: 141.
- [114] HUTERER D, COORAY A. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71: 023506.
- [115] ALAM U, et al. *JCAP*, 2004, 0406:008.
- [116] WANG Y, TEGMARK M. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71:103 513.
- [117] LAZKOZ R, et al. 2005, astro-ph/0503230.
- [118] FENG B, WANG X L, ZHANG X M. *Phys.Lett* [J]. 2005, B607: 35.
- [119] VIKMAN A. *Phys.Rev*[J]. 2005, D71:023515.
- [120] GUO Z K, et al. *Phys.Lett*[J]. 2005, B608:177.
- [121] ZHANG X F, et al, 2005, astro-ph/0501652.
- [122] ZHAO G B, et al, 2005, astro-ph/0507482.
- [123] ZHANG X, WU F Q. *Phys.Rev*[J]. 2005, D72:043524.
- [124] ZHANG X. *Int.J.Mod.Phys*[J]. 2005, D14:1 597.
- [125] LI M Z, FENG B, ZHANG X M. 2005, hep-ph/0503268.
- [126] Perivolaropoulos L, 2005, astro-ph/0504582.
- [127] LUO M X, SU Q P. 2005, astro-ph/0506093.
- [128] CAI R G, ZHANG H S, WANG A.Z. 2005, hep-th/0505186.
- [129] AREF-EVA I Y, et al. *Phys.Rev*[J]. 2005, D72:064017.
- [130] HUANG C G, GUO H Y. 2005, astro-ph/0508171.
- [131] ZHAO W, ZHANG Y. 2005, astro-ph/0510356.

(责任编辑 胡春华)