



黏滞性流体与宇宙年龄问题

冯朝君*, 李新洲

上海师范大学, 天体物理联合研究中心, 上海 200234

*E-mail: fengcj@shnu.edu.cn, kychz@shnu.edu.cn

收稿日期: 2011-09-07; 接受日期: 2011-10-09; 网络出版日期: 2011-11-25

国家自然科学基金 (批准号: 11105091, 11047138)、国家教育基金 (编号: 2009312711004) 和上海市自然科学基金 (批准号: 10ZR1422000) 资助项目

摘要 在宇宙的演化过程当中, 经历了暴胀、辐射以及物质为主时期. 如果宇宙现在仍处于物质为主时期, 那么理论上所得到的宇宙年龄大概是在 80~100 亿年左右. 另一方面, 人们测得一些古老星团的年龄超过了 110 亿年, 由此可见, 理论预言与观测结果不相符合, 这就是宇宙的年龄问题. 当前的观测表明宇宙正处于加速膨胀时期, 人们通常将加速的原因归结于宇宙中存在一种被称为暗能量的物质组分. 人们进一步发现由于这种组分可以使理论上预言的宇宙年龄变大, 从而缓解了宇宙年龄问题. 可是, 最新的观测表明, 仍有一些天体的年龄比预言的宇宙年龄要大, 比如说类星体 APM 08279 + 5255, 它在红移等于 3.91 时的年龄大概是 21 亿年, 超过了当时的宇宙年龄. 事实上, 通常人们在研究宇宙学中, 仅仅考虑了理想流体这一简单模型, 而该模型可能过于简单. 因此, 本文将考虑带有黏滞性的流体. 通过引入黏滞性, 宇宙的年龄问题被进一步缓解了. 尽管, 本文考虑一类被称为 Ricci 暗能量的模型, 但是所得到的结论可以推广和应用到各种暗能量模型中.

关键词 黏滞性, 宇宙学年龄, 暗能量

PACS: 95.36.+x, 98.80.Es, 98.80.-k

1 引言

当前, 随着科学技术的进步, 宇宙学的发展异常迅速, 自 20 个世纪末, 我们已经进入了研究宇宙学的黄金时期, 同时也是精密宇宙学开始逐步发展的重要和关键时期. 宇宙是神秘和深邃的, 人们在探求宇宙中未知事物的时候, 必然会遇到这样或那样的困惑和问题. 宇宙学年龄问题便是一个不断得到重新审视的问题之一. 人们通常认为宇宙自大爆炸诞生以来, 经历了暴胀、辐射、物质为主时期以及现在的加速膨胀时期. 在宇宙演化的历程中, 随着宇宙温度不断地下降, 早期量子扰动演化成了经典扰动, 并由于引力的不稳定性逐渐地形成现在大尺度结构, 比如说星

系、星系团等. 如果我们假设因果性成立的话, 宇宙的年龄自然要比这些天体结构的年龄大.

在发现宇宙加速膨胀之前, 人们认为现在的宇宙处于物质为主时期, 即 $\Omega_{m0} \approx 1$, 由此, 可以得到宇宙年龄的理论值大概是 80~100 亿年左右. 另一方面, 人们观测到有一些天体, 比如一些古老的球状星团, 通过测得其金属丰度来求出它的年龄超过了 110 亿年. 由此可见, 理论预言与观测结果不相符合, 这就是宇宙的年龄问题. 随着宇宙学的发展, 人们发现宇宙是在加速膨胀的, 但是通常的物质是不可能推动宇宙加速的, 于是人们引入了一种未知的物质组分并称其为暗能量. 根据现在的实验观测, 暗能量在

引用格式: 冯朝君, 李新洲. 黏滞性流体与宇宙年龄问题. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 1378–1384

Feng C J, Li X Z. Viscous fluid and cosmological age problem (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2010, 41: 1378–1384, doi: 10.1360/132011-977

宇宙中大概占 70%, 而物质 (包括暗物质和重子物质) 只占了不到 30%. 按照这一比例, 人们推算出宇宙的年龄在 130 亿年左右, 看上去似乎已经解决了宇宙年龄问题. 可是, 随着对宇宙中天体的不断观测和研究, 人们发现仍有一些天体的年龄比预言的宇宙年龄要大, 比如说类星体 APM 08279 + 5255, 它在红移等于 3.91 时的年龄大概是 21 亿年^[1], 超过了当时的宇宙年龄, 因此, 我们仍然需要进一步分析和解决宇宙年龄问题.

事实上, 理论预言的年龄 (或者说年龄关于红移的曲线) 之所以要小一些, 是因为物质的能量密度衰减得太快了. 我们知道, 如果假设宇宙中存在的物质是理想流体, 那么该物质随标度因子的三次方衰减的. 不过, 理想流体与力学中的质点一样, 是一个非常简化的模型, 现实中并不存在质点或者是理想流体, 所以, 在宇宙学的研究中, 理想流体的假设或许是过于简化的. 接下来的问题是, 宇宙中非理想流体物质能量密度究竟如何随宇宙的膨胀而衰减需要进一步地研究和探讨.

非理想流体的动力学实际上是一种耗散过程. 宇宙中的耗散过程由体黏滞、剪切黏滞和热传导来描述, 在文献 [2~4] 中已经对这些耗散过程进行了认真的研究. 物理学家 Eckart 建立了关于相对论性非理想流体耗散过程的一般性理论^[5], 与此同时, 物理学家 Landau 和 Lifshitz 也建立了相关理论^[6], 两者只是数学形式上有一些差别. 但是这些理论仅仅是对热平衡状态的一阶背离, 因此可能会存在因果性问题, 而完整的考虑了因果性问题的耗散理论则是由物理学家 Isreal 和 Stewart 等人发展的^[7~10], 并且已经被应用到早期宇宙学中^[11]. 然而, 在完整的理论中, 特征演化方程变得非常复杂而难以求解. 幸运的是, 如果我们所研究的现象处于准热平衡状态, 或者说当流体粒子的变化速度相对于平均自由程或者碰撞事件尺度来说非常缓慢的时候, 先前的理论还是适用的. 在研究均匀和各向同性的宇宙时, 从实际应用出发, 我们可以从热力学的角度考虑流体 (物质、暗能量等) 在耗散过程中所具有的体黏滞性 (通常用符号 ζ 来表示), 而同时可以将剪切黏滞 (用符号 η 表示) 忽略掉, 具体可以参考文献 [12]. 关于黏滞性暗能量模型, 可以参考文献 [13~22].

事实上, 体黏滞的引入相当于为流体重新定义了一个有效的压强 p_{eff} , 这是根据 $p_{\text{eff}} = p - 3\zeta H$ 这个式子得到的, 其中 ζ 被称为体黏滞系数, H 被称为 Hubble 参数. 同时, 为了要求热力学第二定律, 即熵增加定律成立, 系数 ζ 必须大于零, 即满足条件 $\zeta > 0$ ^[23].

在本文中, 我们假定宇宙中的物质不再是理想流体, 而是具有黏滞性的. 我们发现, 通过考虑物质的黏滞性, 宇宙的年龄问题被进一步缓解了. 尽管本文所考虑的是一类被称为 Ricci 暗能量模型, 但是这一结论可以推广和应用到各种暗能量模型中. 需要注意的是, 本文假设物质和暗能量都具有体黏滞性, 并且黏滞系数取为 $\zeta = \sqrt{3}\tau H$, 这就意味着体黏滞正比于该流体的速度. 这是非常自然的一种假设, 并且这种假设已经在天体物理的理论框架中得到了广泛的采用, 具体可以参考物理学家 Grøn 所写的综述性论文^[24].

2 Ricci 暗能量模型的简介

在讨论 Ricci 暗能量模型之前, 我们先引入全息原理和全息暗能量的概念. 全息原理认为, 在一个给定区域内, 一个量子场的最大熵不会超过同样大小的黑洞的熵, 即黑洞熵最大:

$$(L\Lambda_{UV})^3 \leq S_{BH} = \pi L^2 M_{pl}^2, \quad (1)$$

其中 S_{BH} 为黑洞的熵, L 是该量子场论所在区域的大小, 我们也可以把 L 看成是这个量子场的红外截断. (1) 式被称之为 Bekenstein 熵限.

Cohen 等人对全息原理做了进一步研究, 他们认为量子场论的熵达到熵限的时候, 量子场论的能量已经超过了同样大小的黑洞的能量, 则量子场论的 Schwarzschild 半径已经大于 L , 显然此时的量子场论不能忽略引力的效应, 或者说量子场论在达到熵限之前就已经不适用了. 基于这个事实, 他们提出了更加严格的熵限, 在一个给定区域内, 一个量子场的最大能量不会超过同样大小的黑洞的能量: $L^3 \Lambda_{UV}^4 \leq M_{BH} = \pi L M_{pl}^2$, 当然我们也可以把它重新写为

$$(L\Lambda_{UV})^4 \leq S_{BH} = \pi L^2 M_{pl}^2. \quad (2)$$

显然, 当 (2) 式取等号的时候, 量子场论的熵为 $S = S_{BH}^{3/4}$.

我们知道, 宇宙学常数精细调节问题, 由于量子场论的零点能非常大, 大概要比观测值大 120 个数量级, 而零点能的计算是基于定域量子场论的, 如果有一个非定域的限制条件来限制定域量子场论的适用范围, 即对紫外截断 Λ_{UV} 有所限制, 那么得到的计算结果就有可能符合观测. 以上所讨论的全息原理, 事实上就是这种非定域的限制. 从另一个角度来看, 定域场论所计算出的真空能来源于自由度的重复计算, 而全息原理恰恰可以防止这一点, 即对自由度做了限制. 于是, 人们尝试将全息原理应用到对暗能量研究中来, 从而构造出全息暗能量模型.

全息原理告诉我们量子场论的紫外截断是被这个量子场论所在区域的大小, 也就是红外截断所限制的, 因此, 所能取最大的紫外截断就是当 (2) 式取等号时. 此时, 量子场的真空能密度或者说是暗能量的能量密度为

$$\rho_\Lambda = 3c^2 m_{pl}^2 L^{-2}, \quad (3)$$

其中 c 是一个比例常数, m_{pl} 是约化 Planck 质量. 方程 (3) 就是全息暗能量的基本假设和出发点.

现在的问题是如何选择红外截断 L , 最先能够想到的是, 我们将 L 取为宇宙的大小, 即 Hubble 尺度 H^{-1} , 那么, 所得到的暗能量的能量密度是符合观测的. 可是, 这种取法是有问题的, 我们无法得到一个正确的暗能量物态方程, 它看起来更像物质, 因此它不能够使宇宙加速膨胀, 换句话说它不是暗能量. 同样, 如果粒子视界来作为红外截断 L , 也是得不到一个正确的暗能量的物态方程. 但是, 如果使用未来视界来作为截断 L , 就可以得到一个正确的暗能量物态方程 [25], 其中, 未来视界的定义为

$$R_h = a(t) \int_t^\infty \frac{dt'}{a(t')}, \quad (4)$$

计算表明, 暗能量的物态方程为

$$w = -\frac{1}{3} - \frac{2}{3c} \sqrt{\Omega_\Lambda} < -\frac{1}{3}. \quad (5)$$

实际上, 也可以选择 Ricci 标量平方根的倒数来作为红外截断, 这种模型便成为 Ricci 暗能量模型 [26]. 计算表明, 该模型和观测数据符合得比较好. 如果假设宇宙中的黑洞是由于引力坍塌形成的, 那么宇宙中能够形成的最大的黑洞将由被称为因果尺度 R_{CC}

来决定, 这一尺度是由扰动方程给出的, 类似于人们熟知的 “Jeans” 尺度. 对于平坦宇宙中的张量扰动而言, $R_{CC}^{-2} = \text{Max}(\dot{H} + 2H^2, -\dot{H})$, 并且根据文献 [27] 中的结论, 当真空能量 (暗能量) 密度作为一个独立的守恒能量组分的时候, 只有满足 $R_{CC}^{-2} = \dot{H} + 2H^2$, 才会和当前的宇宙观测是自洽的. 我们知道, 在平坦的 Friedmann-Robertson-Walker (FRW) 宇宙中, Ricci 标量为 $R = 6(\dot{H} + 2H^2)$, 可见 $R_{CC}^{-2} \propto R$. 因此, 如果我们取 $L = R_{CC}^{-1}$, 就可以得到 Ricci 暗能量模型. 之前, 我们也研究了 Ricci 暗能量模型的一些性质, 在此, 我们仅仅做了一个简单的介绍, 具体细节可以参考文献 [28~34].

3 带有黏滞性的 Ricci 暗能量

在平坦宇宙中, Ricci 暗能量的能量密度为

$$\rho_R = \frac{\alpha}{2} R = 3\alpha (\dot{H} + 2H^2), \quad (6)$$

在本文中, 设 $8\pi G = 1$. 这里的比例系数 α 是一个无量纲的常数, 它将对 Ricci 暗能量的演化起着重要的作用. 通过求解 Friedmann 方程, 可以求出 ρ_R 随标度因子的演化关系, 再通过连续性方程, 可以得到它的有效压强 p_R , 从而得到其状态方程 $w = p_R/\rho_R$. 在这里, 我们假定宇宙是由 Ricci 暗能量和物质共同主导的, 并且设 $\zeta_R = \sqrt{3}\tau_R H$ 和 $\zeta_\gamma = \sqrt{3}\tau_\gamma H$. 通常的物质其状态方程参数为 $w_\gamma = \gamma - 1$, 如果是暗物质的话, $\gamma = 1$. 通过计算, 得到

$$w_R \equiv \frac{p_R}{\rho_R} = -1 + \frac{C_1(12\sqrt{3}\tau_R + \lambda^+ \Pi^-)}{3(C_1 \Pi^- + C_2 \Pi^+ e^{2\Delta x})} + \frac{C_2(12\sqrt{3}\tau_R + \lambda^- \Pi^+)}{3(C_1 \Pi^- + C_2 \Pi^+ e^{2\Delta x})} e^{2\Delta x}, \quad (7)$$

这里定义了一些量, 其中包括

$$\Pi^\pm = 2 + 4\alpha - 3\alpha\gamma \pm 2\alpha\Delta, \quad (8)$$

$$\Delta = \frac{1}{2\alpha} \sqrt{(2 - 4\alpha + 3\alpha\gamma)^2 - 24\sqrt{3}\alpha\tau_\gamma}, \quad (9)$$

这里的 C_1, C_2 是积分常数, 并且满足如下关系

$$C_1 = 1 - C_2 = \frac{\Omega_{\gamma 0}}{\alpha\Delta} - \frac{\Sigma^-}{4\alpha\Delta}, \quad (10)$$

其中, 定义了无量纲的密度参数 $\Omega_{\gamma 0} \equiv \rho_{\gamma 0}/(3H_0^2)$, 以及

$$\Sigma^- = 2 - 4\alpha + 3\alpha\gamma - 2\alpha\Delta. \quad (11)$$

如果考虑暗物质的情形, 即 $\gamma = 1$ ($w_m = 0$), 并假设 $\tau_m \ll (2 - \alpha)^2 / (24\sqrt{3}\alpha)$, 我们可以得到化简以后的状态方程参数在今天的值:

$$w_{R0} \approx -\frac{1}{3} \left[\frac{2}{\alpha} - \frac{1+3\sqrt{3}(\tau_R + \tau_m)}{1 - \Omega_{m0}} \right], \quad (12)$$

因此, 为了能够推动宇宙在现在加速膨胀, 要求

$$\alpha < \frac{2(1 - \Omega_{m0})}{2 - \Omega_{m0} + 3\sqrt{3}(\tau_R + \tau_m)}, \quad (13)$$

同时, 也可以得到状态方程在过去和将来时刻的值:

$$w_R(x \rightarrow -\infty) \approx \frac{2\sqrt{3}}{\alpha} \left[\tau_R - \frac{\alpha}{2 - \alpha} \tau_m \right], \quad (14)$$

$$w_R(x \rightarrow \infty) \approx -\frac{1}{3} \left(\frac{2}{\alpha} - 1 \right) \quad (15)$$

$$+ 2\sqrt{3} \left(\frac{\tau_R}{2} + \frac{\tau_m}{2 - \alpha} \right), \quad (16)$$

其中, 假设了 τ_R 与 τ_γ 是一个数量级的, 并且保留到线性项.

4 宇宙年龄

在红移 z 时刻的宇宙年龄可以由公式 $t(z) = T(z)/H_0$ 得到, 其中

$$T(z) = \int_z^\infty \frac{dz'}{(1+z')E(z)} = \int_{-\infty}^{-\ln(1+z)} \frac{dx}{E(x)}, \quad (17)$$

被称为无量纲化的年龄参数. 对于平坦的暗物质主导 ($\Omega_{m0} = 1$) 的宇宙 (CDM 模型) 来说, $t_0 = 2/(3H_0)$. 并且, 根据 Hubble 空间天文望远镜重点项目的观测数据, 现在的 Hubble 参数被限制到 $H_0^{-1} = 9.776h^{-1}$, $0.64 < h < 0.80$, 这一结果与从宇宙微波背景辐射 (CMB) 和大尺度结构的观测是相互自洽的. 于是, 它给出宇宙的年龄大概为 $t_0 \approx 80 \sim 100$ 亿年. 但是, 这一理论上预言的宇宙年龄值不满足星系年龄界限: $t_0 > 110 \sim 120$ 亿年, 就是说宇宙应该比宇宙中所有对象的年龄都要长.

对于宇宙学常数暗物质模型 (LCDM) 而言, 暗物质组分在当前时刻占宇宙总密度大概是 $\Omega_{m0} \approx 0.27$, 因此它的年龄参数为

$$T(z) = \int_z^\infty \frac{dz'}{(1+z') [\Omega_{m0}(1+z)^3 + (1 - \Omega_{m0})]^{1/2}}, \quad (18)$$

由此计算得到的宇宙年龄满足限制条件 $t_0 > 110 \sim 120$ 亿年, 这是由于在该模型中 Ω_{m0} 的值要比 CDM 模型中的小, 因此, 在红移 z 比较大的时候, (18) 式中的积分值要比暗物质主导宇宙中积分大, 所以在 LCDM 模型中所得到的宇宙年龄要大.

在 LCDM 模型中, 我们可以得到在红移 $z = 3.91$ 的时候, 宇宙的年龄大概是 $t(3.91) \approx 0.12H_0^{-1} \approx 14.4 \sim 17.9$ 亿年, 这要比在同样红移处的类星体 APM 08279 + 5255 的年龄要小, 人们测得该类星体的年龄在那时大概是 21 亿年. 同样, 在 Ricci 暗能量模型中, 如果不考虑流体的黏滞性, 我们得到 $t(3.91) \approx 0.10H_0^{-1} \approx 12.6 \sim 15.7$ 亿年, 即宇宙要比类星体 APM 08279 + 5255 要年轻. 实际上, 还有几个古老的类星体 (具有不同的红移), 他们的年龄也比通常在 LCDM 或者是 Ricci 暗能量模型中计算所得的要大. 这就说明, 仅仅引入暗能量组分, 还不足以完全解决宇宙的年龄问题.

在 Ricci 暗能量模型中, 我们在图 1 和 2 中绘制了宇宙的总年龄随着参数变化的曲线. 在图 1 中, 我们所选取的参数值为 $h = 0.72$ 和 $\Omega_{m0} = 0.20$ (实线), 0.27 (划线), 0.32 (虚线). 其次, 图中的水平阴影部分对应于星系给出的年龄界限, 即 $t_0 = 100 \sim 120$ 亿年. 在图 2 中, 我们选取的参数为 $h = 0.72$, $\Omega_{m0} = 0.27$ 以及 $\alpha = 0.46$ (实线), 0.76 (划线), 1.0 (点划线). 值得注意的是, 当 $\alpha \leq 1/3$ 的时候, 会引起扰动的不稳定, 见文献 [30], 因此我们选择参数 $\alpha > 1/3$.

图 2 中的黑点表示宇宙中的一些古老的星体: 在红移 $z = 1.43$ 处, 年龄为 $t = 35$ 亿年的 LBDS 53W091^[35], 在红移 $z = 1.55$ 处, 年龄为 $t = 40$ 亿年的

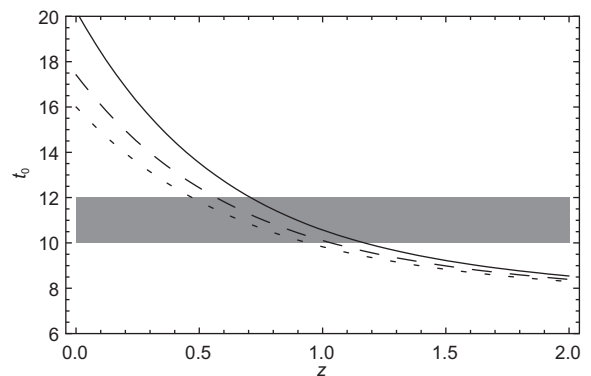


图 1 Ricci 暗能量模型中的宇宙的年龄曲线

Figure 1 The age of the universe in Ricci dark energy model.

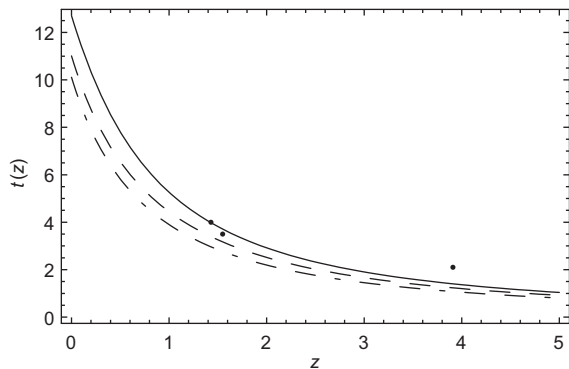


图2 Ricci暗能量模型中的宇宙年龄随参数 α 的变化曲线
Figure 2 The age of the universe with α in Ricci dark energy model.

LBDS 53W069^[36], 以及在红移 $z = 3.91$ 处, 年龄为 $t = 21$ 亿年的 APM 08279 + 5255^[1]. 从公式 (18) 可见, 由于物质随宇宙膨胀衰减的太快, 以至于宇宙的年龄小于这些古老的星体. 当然, 也许有另外一种可能性引起了年龄变小, 那就是今天的物质组分所占的比例还要小一些, 不过, 由于宇宙早期核合成过程对这个比例有很强的限制, 过大或者过小的比例, 会导致氦元素丰度发生变化, 因此, 这种可能性非常小.

当我们引入了流体的黏滞性之后, 宇宙的年龄问题一定程度上被缓解了. 我们在图 3 中绘制了在这一情形下, 宇宙年龄随参数 α 的变化曲线. 在图 3 中, 我们选用的参数为: $\alpha = 0.46$ 和 $\tau_m = 0$ (实线), 0.03(划线), 0.06(点划线). 由图 3 可见, 黏滞性确实是缓解了宇宙年龄问题.

事实上, 起到主要因素的是暗物质组分的黏滞性, 正是它的帮助影响了宇宙年龄的演化, 所以, 在

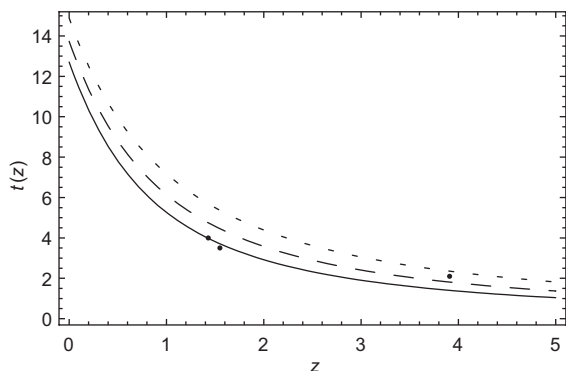


图3 考虑黏滞性的宇宙年龄的演化随参数 α 的变化曲线
Figure 3 The age of the viscous universe with α .

其他的暗能量模型中, 包括 LCDM 模型中, 它也可以缓解宇宙的年龄问题.

5 讨论和展望

在本文中, 我们讨论和研究了黏滞性流体在宇宙学中的应用, 尤其是缓解了宇宙的年龄问题. 我们特别讨论了一类基于全息原理的 Ricci 暗能量模型, 在该模型中, 我们假设物质和暗能量都具有体黏滞性, 于是能量守恒方程将会增加一项正比于体黏滞系数的项, 换句话说, 相当于修改了流体的压强. 通过引入黏滞性, 我们发现, 理论预言的宇宙年龄将会比现在所观测到的最古老的星体的年龄要大, 这样在一定程度上缓解了宇宙的年龄问题. 事实上, 通过观察计算宇宙年龄的公式, 我们会发现, 宇宙年龄会因为物质随宇宙膨胀衰减的过快而变得小了, 而从直观上就可以理解, 黏滞性会使物质的衰减变得缓慢一些, 这样它能够解决宇宙年龄问题也是自然而然了. 在这里, 虽然我们针对一类特别的暗能量模型进行研究, 但我们的研究结果可以适用于其他暗能量模型, 包括最简单的 LCDM 模型.

在最近的研究中, 很多作者也同样指出了宇宙的年龄问题, 例如文献 [37,38] 等. 为了缓解这一问题, 他们适当得考虑了暗能量和暗物质的相互作用, 并假定了几类相互作用的形式. 但是, 由于暗物质的成团特性, 这种相互作用肯定是非常微小的. 实验数据表明, 仅仅考虑此类相互作用也是很难解决宇宙年龄问题的^[37]. 而在我们的工作中, 就不存在这个困难.

事实上, 现实中的任何流体都具有黏滞性, 理想流体仅仅是一种理论抽象, 就像在研究地球公转的时候, 将地球看成质点是合理的, 而在研究地球自转的时候, 再把地球看成质点是不合理的一样, 或许将宇宙中的流体简化成理想流体是有些过分的简单化了, 因此, 考虑具有黏滞性的流体是非常值得进一步研究的. 此外, 黏滞性在天体物理的研究中也是非常必要的^[24]. 目前, 我们也正在用最新的数据对带有黏滞性流体的宇宙模型进行数据拟合, 来定量地研究黏滞性在多大程度上缓解甚至解决了宇宙年龄问题.

致谢 感谢张新民研究员和詹虎研究员的邀请参加“21 世纪第二个十年的宇宙学”研讨会. 感谢陈学雷研究员和高长军研究员关于该研究工作进展的热情讨论.

参考文献

- 1 Jain D, Dev A. Age of high redshift objects-a litmus test for the dark energy models. *Phys Lett B*, 2006, 633: 436–440
- 2 Barrow J D. The deflationary universe: An instability of the de sitter universe. *Phys Lett B*, 1986, 180: 335–339
- 3 Brevik I, Odintsov S D. On the Cardy-Verlinde entropy formula in viscous cosmology. *Phys Rev D*, 2002, 65(6): 067302
- 4 Liu D J, Li X Z. Dynamics of quintessence with thermal interactions. *Phys Lett B*, 2005, 611: 8–14
- 5 Eckart C. The thermodynamics of irreversible processes. 3. Relativistic theory of the simple fluid. *Phys Rev*, 1940, 58: 919–924
- 6 Landau L D, Lifshitz E M. *Fluid Mechanics*. London: Butterworth Heinemann, 1987
- 7 Israel W. Nonstationary irreversible thermodynamics: A causal relativistic theory. *Ann Phys*, 1976, 100: 310–331
- 8 Israel W, Stewart J M. Thermodynamics of nonstationary and transient effects in a relativistic gas. *Phys Lett A*, 1976, 58: 213–215
- 9 Hiscock W A, Salmomson J. Dissipative Boltzmann-Robertson-Walker cosmologies. *Phys Rev D*, 1991, 43(10): 3249–3258
- 10 Maartens R. Dissipative cosmology. *Class Quantum Grav*, 1995, 12: 1455–1465
- 11 Harko T, Mak M K. Viscous Bianchi type I universes in brane cosmology. *Class Quantum Grav*, 2003, 20: 407–422
- 12 Brevik I H, Gorbunova O. Dark energy and viscous cosmology. *Gen Rel Grav*, 2005, 37: 2039–2045
- 13 Zhai X H, Xu Y D, Li X Z. Viscous generalized Chaplygin gas. *Int J Mod Phys D*, 2006, 15: 1151–1162
- 14 Sun C B, Wang J L, Li X Z. Viscous Cardassian universe. *Int J Mod Phys D*, 2009, 18: 1303–1318
- 15 Cruz N, Lepe S, Pena F. Dissipative generalized Chaplygin gas as phantom dark energy. *Phys Lett B*, 2007, 646: 177–182
- 16 Meng X H, Ren J, Hu M G. Friedmann cosmology with a generalized equation of state and bulk viscosity. *Commun Theor Phys*, 2007, 47: 379–384
- 17 Ren J, Meng X H. Cosmological model with viscosity media (dark fluid) described by an effective equation of state. *Phys Lett B*, 2006, 633: 1–8
- 18 Hu M G, Meng X H. Bulk viscous cosmology: Statefinder and entropy. *Phys Lett B*, 2006, 635: 186–194
- 19 Avelino A, Nucamendi U. Can a matter-dominated model with constant bulk viscosity drive the accelerated expansion of the universe? *J Cosmol Astropart P*, 2009, 0904: 006
- 20 Mota D F, Kristiansen J R, Koivisto T, et al. Constraining dark energy anisotropic stress. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2007, 382: 793–800
- 21 Koivisto T, Mota D F. Dark energy anisotropic stress and large scale structure formation. *Phys Rev D*, 2006, 73(8): 083502
- 22 Padmanabhan T, Chitre S M. Viscous universes. *Phys Lett A*, 1987 120: 433–436
- 23 Zimdahl W, Pavón D. Expanding universe with positive bulk viscous pressures? *Phys Rev D*, 2000, 61(10): 108301
- 24 Grøn O. Viscous inflationary universe models. *Astrophys Space Sci*, 1990, 173: 191–225
- 25 Li M. A model of holographic dark energy. *Phys Lett B*, 2004, 603: 1–5
- 26 Gao C J, Wu F Q, Chen X L, et al. A holographic dark energy model from ricci scalar curvature. *Phys Rev D*, 2009, 79(4): 043511
- 27 Cai R G, Hu B, Zhang Y. Holography, UV/IR relation, causal entropy bound and dark energy. *Commun Theor Phys*, 2009, 51: 954–960
- 28 Feng C J, Li X Z. Viscous ricci dark energy. *Phys Lett B*, 2009, 680: 355–358
- 29 Feng C J, Li X Z. Ricci dark energy in braneworld models with a Gauss-Bonnet term in the bulk. *Phys Lett B*, 2009, 679: 151–155
- 30 Feng C J, Li X Z. Scalar perturbation and stability of ricci dark energy. *Phys Lett B*, 2009, 680: 184–187
- 31 Feng C J, Zhang X. Holographic ricci dark energy in randall-sundrum braneworld: Avoidance of big rip and steady state future. *Phys Lett B*, 2009, 680: 399–403
- 32 Feng C J. Reconstructing $f(R)$ theory from ricci dark energy. *Phys Lett B*, 2009, 676: 168–172
- 33 Feng C J. Reconstructing quintom from ricci dark energy. *Phys Lett B*, 2009, 672: 94–97
- 34 Feng C J. Statefinder diagnosis for ricci dark energy. *Phys Lett B*, 2008, 670: 231–234
- 35 Dunlop J, Peacock J, Spinrad H, et al. A 3.5-Gyr-old galaxy at redshift 1.55. *Nature*, 1996, 381: 581–584
- 36 Spinrad H, Dey A, Stern D, et al. Lbds 53w091: An old red galaxy at $z=1.552$. *Astrophys J*, 1997, 484: 581–601
- 37 Wang S, Li X Dong, Li M. Revisit of cosmic age problem. *Phys Rev D*, 2010, 82(10): 103006
- 38 Cui J L, Zhang X. Cosmic age problem revisited in the holographic dark energy model. *Phys Lett B*, 2010, 690: 233–238

Viscous fluid and cosmological age problem

FENG ChaoJun* & LI XinZhou

Shanghai United Center for Astrophysics (SUCA), Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Our Universe has been dominated by inflaton field, radiation and matter during its evolution. If we still in the time that matter dominated, the age of the Universe is around 8–10 Gys. On the other side, some old objects living in the Universe have been found at some redshifts, whose ages are around 11 Gys. So they are even older than the Universe. But, the Universe should not be younger than any objects, thus, the prediction value of age is not consistent with observations, this is the so-called cosmological age problem. If one wanted to make them consistent, the current value of Hubble parameter should be assumed smaller, but there is no such evidence. After people finding that the Universe is accelerating, and introducing a unknown component called dark energy, the prediction value of age becomes larger. However, recently, some older objects are still found to be older than the universe, especially when we consider the object APM 08279 + 5255 at $z = 3.91$ with age $t = 2.1$ Gys. So, we should study it further by considering viscous fluid in the Universe, since perfect fluid may be a strict assumption. In this paper, we find that once the viscosity is taken into account, this age problem is alleviated and as a example we consider a special model called Ricci dark energy in this paper.

viscosity, age of the Universe, dark energy

PACS: 95.36.+x, 98.80.Es, 98.80.-k

doi: 10.1360/132011-977