

修改引力宇宙学下的大尺度 结构非线性演化

崔伟广 *

(中国科学院 上海天文台, 星系宇宙学重点实验室, 上海 200030)

摘要: 主要研究了修改引力论在非线性的尺度上的表现。现在已经存在很多修改引力论的模型, 如 $f(R)$, DGP, Mond 等, 但是在工作中并没有使用别人已经提出的修改引力论方法, 因为首先不可能去对所有的修改引力论模型都进行研究; 其次重点研究的是修改引力对于宇宙中的物质分布在非线性尺度上的影响, 而各种修改引力论对于物质聚集的影响是相似的, 都可以通过一个参数表达出来。因此笔者提出一种修改引力论的方法, 引进了一个简单参数 ζ 。这个参数 ζ 定义为 $\frac{G_{\text{eff}}/G}{-\phi/\psi}$, 这里 G_{eff} 是有效牛顿常数, G 是牛顿常数, ϕ 和 ψ 则是时空度规的标量扰动方程中的两个势。这个 ζ 参数在广义相对论的基础上修改了物质粒子受到的加速度, 加大或者减小这个参数会相应地改变物质粒子的加速度, 进而会加快或者减慢大尺度结构的形成。这种对大尺度结构在线性尺度上的影响可以通过理论计算得到, 但是大尺度结构的非线性增长无法通过理论计算得出, 现在只有借助已经发展得比较成熟的数值模拟方法来研究这个问题。该文修改了现在已经比较成熟的数值模拟程序 GADGET-2, 加入了 ζ 参数。在进行数值模拟之前, 首先检验了数值模拟的质量分辨率、模拟尺度, 以及初始红移对最终物质功率谱的影响, 并且证实修改后的 GADGET-2 程序是正确的。设定不同 ζ 参数的值, $\zeta = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5$, 这里 $\zeta = 1.0$ 对应标准宇宙学, 然后对每个 ζ 值运行了一组数值模拟。

为了减少数值效应对最终结果的影响, 并且突出显示修改引力论在非线性的尺度上的表现, 没有简单直接地使用不同 ζ 值物质功率谱来做比较, 而是精巧地设置不同 ζ 值的输出红移, 使不同 ζ 值在其对应的输出红移处有相同的线性功率谱, 并且最终使用了 $\xi = \frac{\zeta \neq 1.0}{\zeta = 1.0}$ 这个比值参数来研究修改引力论在非线性的尺度上的表现。通过宇宙学尺度上的数值模拟和高精度的小波物质功率谱方法, 我们研究了 ζ 参数对物质在非线性的尺度上增长的影响。通过 ξ 这个参数, 在线性功率谱相同的时候, 比较了不同 ζ 参数的功率谱在非线性的尺度上相对于标准宇宙学模型的偏离。得到重大的发现: 大尺度结构在非线性的尺度上的增长并不是想象的那样, 较大的 ζ

* 该作者博士毕业时间: 2010 年 7 月; 指导老师: 中国科学院上海天文台张鹏杰研究员

参数加大了物质粒子的加速度, 进而在线性和非线性尺度上都加快了结构形成, 反而是在线性功率谱相同的时候, 较大值的 ζ 给出了较小的非线性功率谱。这个发现也证明 HKLM 假定的不正确, 从而证明基于这个假定的功率谱拟合公式 (PD96, Smith2003) 不适用于修改引力论, 直接将这些功率谱拟合公式推广到修改引力论是不正确的。基于这个 ζ 参数的修改引力论模型, 利用一系列的数值模拟的结果, 为修改引力论提出了一个新的拟合公式。这个新的拟合公式不是对现有的这些拟合公式做推广, 而是借助于标准宇宙学下的非线性功率谱, 通过几个简单的参数就可以得到对应不同 ζ 值的非线性功率谱, 而且其精度保证在 5% 以内。利用这套数值模拟的结果, 我们进而研究 ζ 修改引力论下的本动速度场的功率谱、暗晕的质量方程, 以及暗晕的性质。这些工作为我们从观测上区分修改引力论和广义相对论提供了理论指导。

Modified Gravity (MG) Model on Nonlinear Scale

CUI Wei-guang

(Key Laboratory for Research in Galaxies and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: This thesis mainly focuses on the effects of modified gravity (MG) model on nonlinear scale. There are many different modified gravity models at present, e.g. f(R), DGP, MOND, etc. We do not use other's model directly, because most of those modified gravity models have similar effect on the matter distribution. Here, we proposed a different model. This model is based on a new parameter ζ , which is defined as $\frac{G_{eff}/G}{-\phi/\psi}$, where G_{eff} is effective Newton's constant, G is Newton's constant, and ϕ, ψ are the two potentials in the scalar perturbation of the space-time metric. This parameter mainly changes the particles' acceleration. So, it will increase or decrease the structure formation. The linear effect can be calculated through theory. However, simulation is the only way which we can get the nonlinear evolution of large scale structure. We modified the mature simulation program—GADGET-2, and added ζ parameter in it. Before the simulation begins, we checked the effects of the mass resolution, simulation box, and initial redshift, and we also checked the correctness of the modified program. We set different value of ζ , $\zeta = 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.5$, and begin our simulation.

In order to reduce the numerical effect, and to show the modified gravity effects on non-linear scale, we do not use power spectrum directly. Instead, we set different output redshift for ζ , and make sure that different ζ have the same linear power spectrum at its output redshift. We used

$$\xi = \frac{\zeta \neq 1.0}{\zeta = 1.0} \text{ at last.}$$

After performing a series of simulations with cosmological scale, and using our wavelets method to calculate power spectrum, we are able to precisely study this MG method on nonlinear scale. We specify the output of the snapshot when different ζ have the same linear power spectrum. Those sets of output make an easy comparison on nonlinear scale. We find that the nonlinear power spectrum is the same as the linear power spectrum or increase with larger ζ . This result denies the assumption of HKLM, so, all the all-known power spectrum fitting formula which are based on this assumption are not suited for MG models. Further, based on our model, we come up with a new fitting formula, which is not an extension of those power spectrum. The new modified gravity non-linear power spectrum fitting formula is based on non-linear power spectrum, and it can be got through several parameters with a 5% accuracy. We will continue to work on the peculiar velocity power spectrum of this MG simulations, halo mass function and the properties of halo. Those works will provide a guide for investigating those MG models on observations.