

文章编号: 1000-8349(2007)03-0262-08



WMAP 第 3 年的宇宙学参数 对星系团中巨弧数目的影响

李国亮^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030 ; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 该文利用高精度的大尺度 N 体数值模拟, 研究了 WMAP(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 第 3 年的观测结果对星系团中的巨弧数目的影响, 发现预言的巨弧数目比主流的 Λ CDM 模型预言的要低 80% 多。加入绝热气体几乎不会改变巨弧的发生概率, 而引入恒星形成和超新星反馈后得到的概率不会大于原来的 1.3 倍。如此小的贡献是因为虽然有恒星的数值模拟得到的星系团具有更高的中心密度, 但同时星系团的形状更趋球对称, 这是影响巨弧概率的 2 个相反的因素。以前基于 Λ CDM 模型预言的巨弧概率还不能很好地与观测相符, WMAP 第 3 年的观测结果将更难以解释。

关键词: 天体物理学; 宇宙学; 星系团; 引力透镜

中图分类号: P159 **文献标识码:** A

1 引 言

根据等级成团理论, 宇宙中的结构起源于原初的物质扰动。膨胀理论预言原初扰动是高斯性的, 具有与尺度无关的功率谱 $P(k) \propto k^n (n \approx 1)$ 。膨胀理论并没有预言功率谱幅度的大小, 现在只能通过观测加以测量, 用 σ_8 来表示。 σ_8 定义为一个半径为 $8h^{-1}\text{Mpc}$ 的球内线性物质扰动的均方根, h 是以 $100 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ 为单位的哈勃常数。

线性功率谱可通过多种观测进行测量, 如星系团的丰度、弱引力透镜、赖曼 α 森林等。其中最重要的一种方法是测量宇宙微波背景辐射的温度起伏^[1]。最近 WMAP 第 3 年的结果给出 $\sigma_8 = 0.74$ 、误差小于 10%, 其明显小于主流的 Λ CDM 通常采用的 $\sigma_8 = 0.9$ 。其他一些基于星系成团性的观测也倾向于小的 σ_8 ^[2-5], 但是弱引力透镜和赖曼 α 森林的研究则倾向于大的 σ_8 ^[6-9]。

收稿日期: 2006-05-08 ; **修回日期:** 2006-09-02

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (0203004、10125314、10373012、10533030)

星系团作为宇宙中最大的引力绑定结构,是测量 σ_8 最敏感的探测器。因为他们的丰度敏感地依赖于原初密度涨落的幅度。星系团的丰度可由 X 射线巡天^[10,11] 和光学波段巡天^[12] 给出。但为了利用观测到的丰度来限制结构形成模型,还必须要得到这些星系团相应准确的质量,而这一般很难做到。星系团的强引力透镜作用会使观测到的背景星系发生形变,甚至形成巨弧状的结构^[13-16],而巨弧的发生概率与星系团的质量和丰度联系在一起。最近基于 $\sigma_8 = 0.9$ 的 Λ CDM 模型的很多工作^[17-20] 给出了巨弧数目的理论预言。Dalal 等人^[17] 和 Wambsganss 等人^[21] 发现理论预言的巨弧数目与观测相符。WMAP 第 3 年的观测结果给出的宇宙是如此不同,使得我们必须重新研究这个模型下理论预言巨弧数目是否依然与观测相符。

本文重点讨论了新的模型下巨弧数目的变化,同时用带有气体和恒星形成的 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 数值模拟来研究重子物质对巨弧数目的影响。

2 N 体数值模拟、星系团的缩放和透镜算法

我们首先给出用到的 3 组宇宙学参数:

$$1) \Omega_{m,0} = 0.268, \quad \Omega_{\Lambda,0} = 0.732, \quad h = 0.71, \quad \Gamma = \Omega_{m,0}h = 0.19, \quad \sigma_8 = 0.84, \quad n = 1;$$

$$2) \Omega_{m,0} = 0.238, \quad \Omega_{\Lambda,0} = 0.762, \quad h = 0.73, \quad \Gamma = \Omega_{m,0}h = 0.174, \quad \sigma_8 = 0.74, \quad n = 0.95;$$

$$3) \Omega_{m,0} = 0.3, \quad \Omega_{\Lambda,0} = 0.7, \quad h = 0.7, \quad \Gamma = \Omega_{m,0}h = 0.21, \quad \sigma_8 = 0.9, \quad n = 1.$$

这 3 个模型分别简称为 WMPA1、WMPA3 和 Λ CDM0。

本文所用的 N 体数值模拟主要由 GADGET2^[22,23] 程序产生。由于这组数值模拟在 WMAP3 发布之前完成,所以宇宙学参数采用的是 WMAP1 模型。在一个边长为 $100h^{-1}$ Mpc 的立方体中,在同样的初始条件下我们作了 3 个具有不同物质组分的数值模拟。第 1 个只包含 512^3 个纯暗物质粒子,第 2 个包含有 512^3 个暗物质粒子和 512^3 个非辐射气体粒子。第 3 个在第二个基础上引入了辐射冷却,恒星形成和超新星反馈。软化因子 $\eta = 5.4h^{-1}$ kpc。3 组模拟具有相同的初始条件,3 种具有不同组分的星系团一一对应,使得我们可以准确地量化重子物质的影响。更详细的说明可以参见文献 [24]。

首先我们用 FOF(friends-of-friends) 方法将每个星系团分辨出来,连接长度等于粒子平均间距的 0.2 倍。团内势能最低点定为团的中心,根据球塌缩模型计算每个星系团的位力半径^[25-27],这个半径以内的所有质量定义为团的位力质量。对于巨弧的统计我们只关心大质量的团,因为小质量的星系团不足以产生巨弧所要求的强引力场。

要得到巨弧的统计信息,就要求有完备的作为透镜星系团的样本。但实际上,由于我们的模拟体积的限制(边长 $100h^{-1}$ Mpc),根本没有产生足够多、足够大的团(如质量大于 $6 \times 10^{14}h^{-1}M_{\odot}$),而这样的星系团对巨弧总的截面贡献最大。单纯依靠现有的样本,无法得到可信的统计信息。为了弥补这个缺陷,我们基于自相似假设将小质量的团放大成大质量的团,同样也可以将大质量的团缩放成小质量的团。假设有一个质量为 M_0 的团需要缩放至 M_s ,首先定义一个缩放比例 $R = (M_s/M_0)^{1/3}$,将原来团内的每个粒子质量乘以 R^3 ,使团的质量变为 M_s ;团内所有粒子的间距扩大为原来的 R 倍,保证团内的平均物质密度保持不变。对于

投影面密度而言, 由于投影面积变为原来的 R^2 倍, 而投影质量增加到原来的 R^3 倍, 所以缩放之后的面密度是原来的 R 倍。

放置一个边长为 $4h^{-1}\text{Mpc}$ 的立方体盒子到给定的星系团的中心, 以盒子里面的粒子作为这个星系团的质量组成。这样的尺度是足够大的, 因为很少有团的位力半径超过 $2h^{-1}\text{Mpc}$, 而且位力半径以外的物质密度成指数衰减。选出这些粒子并将它们沿 3 个垂直的方向投影以得到投影面密度。面密度的计算采用 Li 等人^[28] 提出的 SI 算法, 首先用 3 维 SPH 内核函数计算每个粒子的平滑长度, 平滑粒子数取 64。然后按照这个平滑长度将粒子的质量根据二维的 SPH 内核函数给出的权重分配到投影面的网格上, 网格精度为 2048×2048 。从面密度出发, 通过快速傅里叶变换得到透镜势进而做 Ray-tracing 模拟成像, 最终得到任意位置、任意形状的背景源所成的像的长宽比: L/W 。透镜的红移在 0.325 7, 源平面分别取在 $z = 1$ 、 $z = 2$ 处。背景源的轴比随机分布在 0.5~1 之间, 源的面积固定为 $S = \pi \times (0.5'')^2$, 具有随机的方位角。将这样的源随机撒在源平面上并分析所成像的长宽比, 重复足够多的次数之后我们得到满足一定长宽比限制的巨弧的稳定的发生概率, 或者说发生截面。本文主要计算的是 $L/W > 7.5$ 的巨弧的发生截面。

选出数值模拟产生的前 15 个质量最大的团作为原始样本, 并将他们同时缩放到给定的质量 M_s , M_s 等间隔的分布在对数空间里, 间隔为 0.1, 质量范围在 $10^{14}h^{-1}M_\odot \sim 10^{15.3}h^{-1}M_\odot$ 之间。每个团沿 3 个独立的方向投影, 那么对每一个 M_s , 我们有 $15 \times 3 = 45$ 次实现, 计算每次实现对应的巨弧发生截面, 并最终得到质量为 M 的团的平均发生截面 $\bar{\sigma}(M)$ 。根据不同的宇宙学模型给出的质量函数, 可以很容易地得出相应的宇宙里所有质量小于 M 的团的累积发生截面:

$$\sigma(< M) = \int_0^M \bar{\sigma}(Mt)N(Mt)dMt \quad (1)$$

$N(Mt)dMt$ 表示的是一定体积内, dMt 范围内的, 质量为 Mt 的团的个数。必须要注意的是, 最终结果完全依赖于团的自相似假设, 如果真实的团的密度分布形式从 $10^{14}h^{-1}M_\odot$ 到 $10^{15.3}h^{-1}M_\odot$ 变化非常大的话, 这个假设是不适用的。后面我们给出对这个假设的检验结果。

3 数值模拟的结果

巨弧的发生概率与大质量星系团的数密度直接联系在一起, 与 ΛCDM 宇宙相比 WMAP3 低的质量密度 ($\Omega_{m,0} = 0.238$) 和弱的密度扰动 ($\sigma_8 = 0.74$) 都不利于大质量星系团的形成。图 1 表示的是由扩展的 Press-Schechter 公式给出的 3 个宇宙学在 $z = 0.3257$ 时星系团的质量函数。可以看到在 WMAP3 模型里星系团的数密度总要比 ΛCDM0 低。对于质量在 $10^{14}h^{-1}M_\odot$ 附近的团大约有 2.5 倍的差距, 在 $10^{15.5}h^{-1}M_\odot$ 附近差距扩大到约 30 倍。假设由不同模型在同一红移处产生的同等质量的团具有相同的统计性质, 也就是具有相同的巨弧发生截面, 根据式 (1), 在 WMAP3 模型下累积的发生截面必然要比 ΛCDM0 来得小。当然不同的宇宙学模型对应的宇宙体积也是不同的, WMAP3 确实对应较大的宇宙体积, 但是这个影响是有限的, 两个模型里, $z = 2$ 以内的宇宙体积相差不超过 6%, 远不能弥补质量函数带来的差距。

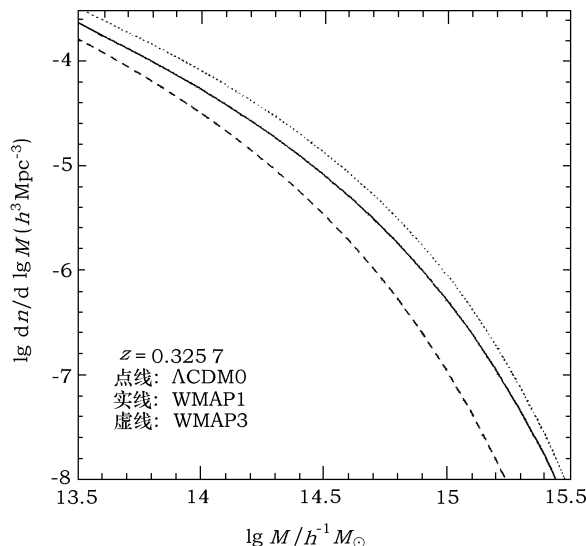


图 1 $z=0.3257$ 时由扩展的 Press-Schechter 公式给出的 3 个宇宙学模型里的星系团的数密度

为了利用现有的小质量的团估计更大的团的透镜性质, 我们用了缩放处理。这个方法基于星系团结构的自相似假设, 而星系团的中心聚集度依赖于本身的质量和宇宙学模型, 所以原则上这样的处理是有问题的。另一方面, 前 15 个最大的团的质量范围在 $9.2 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot} \sim 4.3 \times 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$ 之间, 缩放后的质量范围在 $10^{14} h^{-1} M_{\odot} \sim 10^{15.3} h^{-1} M_{\odot}$ 之间, 两者相差不是很大, 所以缩放得到的团应该能大体代表真实的团的性质。这里我们用一个 Λ CDM0 模型下的纯暗物质数值模拟来检验缩放技术的有效性, 模拟的盒子是一个边长为 $300 h^{-1} \text{Mpc}$ 的立方体, 体积是现在的 27 倍, 包含 512^3 个粒子。将这个体积切成相等的 27 份, 在每个小盒子里, 按照同样的步骤取出前 15 个大团并缩放成不同的质量团, 根据 Λ CDM0 的理论质量函数利用式 (1) 得到相应的累积发生截面。这 27 次实现的结果如图 2 所示。透镜的红移在 0.2896, 图 2(a)、(b) 分别对应源的 $z=1$ 、 $z=2$ 的情况。直方图表示的是 27 个累积发生截面的中值, 误差棒表示 27 次实现的分布范围。由于这个数值模拟有足够多的团, 使我们可以避开缩放直接将每个团的发生截面按照质量顺序加起来, 得到一个真实的累积发生截面, 如图 2 中黑线所示。

对于中值而言, 结果是很理想的, 但是必须看到涨落也相当严重, 大约有 100% 的误差, 说明缩放技术很难给出一个准确的巨弧发生概率。误差的影响大体相当于在式 (1) 右边乘以一个常系数, 而 $\bar{\sigma}(M)$ 基本不随宇宙学模型变化, 对一个原始星系团样本, 缩放技术给出的 WMAP3 和 Λ CDM0 的累积发生截面的比值是不受这个系数影响的。所以虽然我们不能准确地预言 WMAP3 宇宙当中巨弧的具体数目, 但是可以估计 Λ CDM0 和 WMAP3 宇宙中巨弧数目的相对比值。同样, 我们也可以估计引入重子物质之后巨弧数目的相对变化。

巨弧数目的理论预言到底能不能跟观测相符一直是一个很有争议的问题。早期的工作大多利用的是解析的星系团模型^[29-31]。随着计算机技术的发展, 基于 N 体数值模拟的巨弧研究逐渐成为主流^[17-21], 这是一大进步, 因为模拟的团更真实, 自然地具有非球对称性, 子结构以及并合状态等, 这都是解析模型难以做到的。但以前用到的数值模拟仅仅是纯暗物质模型, 没有考虑重子物质的影响。真实宇宙中约 16% 的重子物质组成^[32] 在结构形成中扮演着重要的角色。星系团中心因为恒星形成而降低温度, 使其更加致密, 从而更容易产生巨弧。

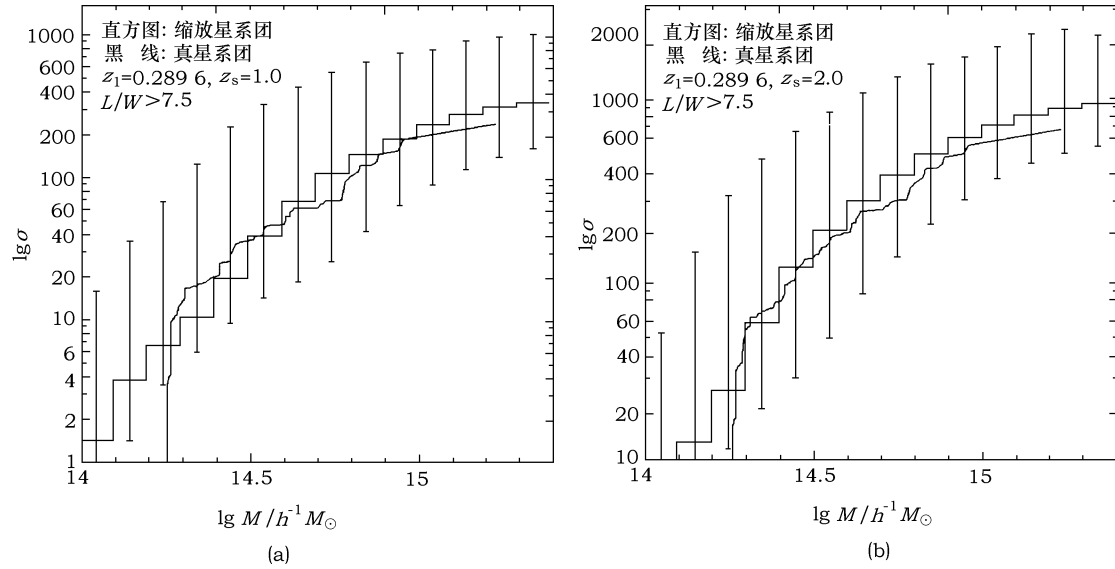


图 2 每个小盒子的团利用缩放技术给出同等体积内所有团的累积发生截面
黑线表示的是边长为 $300h^{-1}\text{Mpc}$ 的 ΛCDM0 数值模拟中, 真实的团给出的累积发生截面。
直方图表示的是中值, 误差棒表示这 27 个累积发生截面的最大范围

我们的 3 组数值模拟中的星系团有一一对应的关系, 可以用来直接比较重子物质对巨弧发生概率的影响。图 3 表示的是 3 种团的巨弧发生截面 $\bar{\sigma}(M)$ 的比值。显然对于仅包含非辐射气体

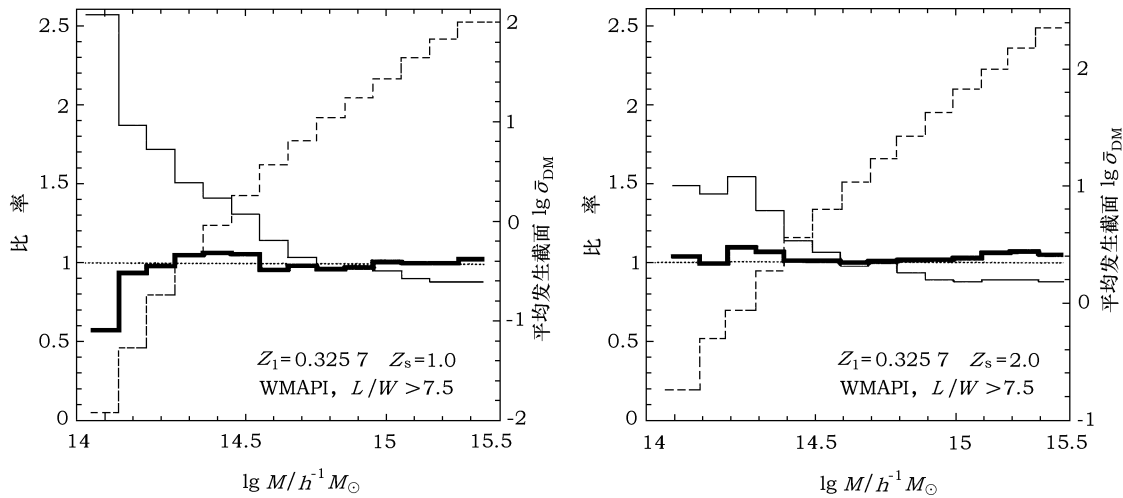


图 3 星系团的平均发生截面

虚的直方图表示的是纯暗物质模拟的不同质量的星系团的平均发生截面, 粗的和细的实线直方图
分别表示的是含绝热气体和有恒星形成的团的平均发生截面与纯暗物质情况下的比值

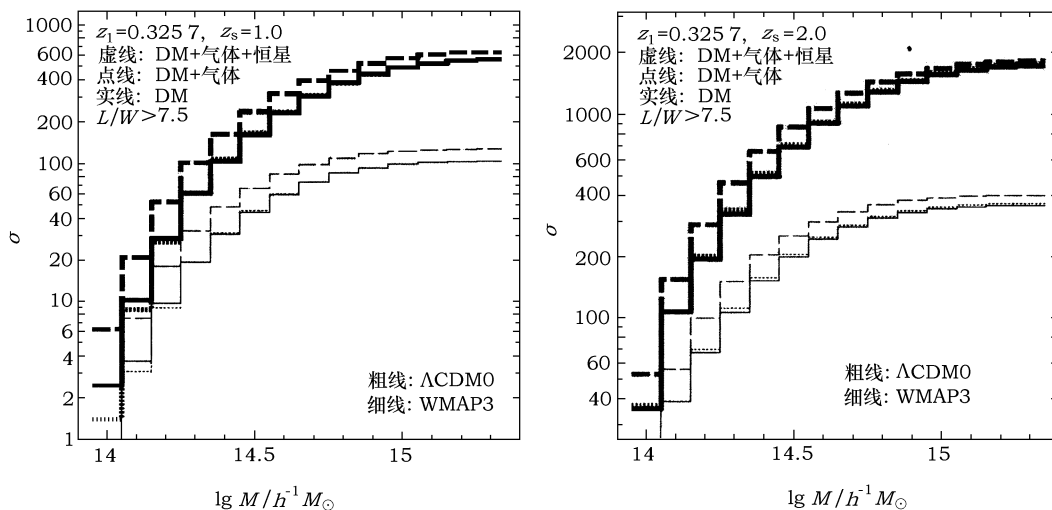


图 4 边长为 $300h^{-1}\text{Mpc}$ 的共动立方体内星系团的累积巨弧发生截面
粗的和细的直方图分别对应 ΛCDM0 和 WMAP3 模型

的模型, 几乎不会改变巨弧发生截面, 说明虽然气体与暗物质粒子有不同的物理行为, 但是由于没有冷却机制, 气体对暗物质晕的改变是微弱的。引入恒星形成后, 变化非常明显, 小质量团的发生截面增加而大质量团的发生截面降低。这是因为小质量团的面密度在临界值附近, 发生截面敏感地依赖于中心面密度的大小。恒星形成过程总是提高了中心密度, 使得星系团的面密度相对于临界值发生了从无到有的变化。大质量的团恒星形成会抬高中心面密度, 其有利于巨弧形成, 但同时也使星系团更加球对称, 而透镜的椭率是巨弧发生截面的一个非常敏感的参量, 球形的透镜最不容易产生巨弧。所以恒星形成对巨弧的产生有两个相反的作用。这解释了为什么图 3 中恒星形成的模拟对应的比值有一个从大于 1 到小于 1 的变化。

利用缩放给出的团的平均发生截面和质量的关系 $\bar{\sigma}(M)$, N 选取边长为 $300h^{-1}\text{Mpc}$ 的立方体内的星系团数密度, 代入式 (1) 得到 3 种不同组分的团在 WMAP3 和 ΛCDM0 模型下的累积发生截面如图 4 所示。如上所说, 由缩放技术带来的误差比较大, 我们暂不考虑准确的巨弧发生截面的大小, 而只关心重子物质和宇宙学模型对巨弧累积发生截面的影响。实线和点线分别对应纯暗物质和加入绝热气体之后的模拟, 两者几乎无法分开, 特别是在大质量端。引入星系形成之后, 确实可以扩大发生截面, 增加巨弧的发生概率, 特别是在小质量端, 而在大质量端, 恒星形成有相反的作用, 如图 3 所示。所以积分之后的差异很有限, 大约只有 20%~30% 的增加。另一个明显的结论是, WMAP3 的巨弧数目只有 ΛCDM0 中的约 1/5, 这还只是基于不同模型下的星系团的自相似假设。实际上, WMAP3 模型的物质密度 ($\Omega_{\text{m},0}=0.238$) 和密度扰动 ($\sigma_8=0.74$) 都低于 ΛCDM0 模型, 不仅不利于大质量团的产生, 即使对于同样红移处同等质量的团, 内部结构也更松散, 所以真实情况下, 这两个模型的差异还要大。

4 总结讨论

我们比较了 WMAP3 模型产生的巨弧数目相对 ΛCDM0 模型的相对变化。同时利用含气

体和恒星的两组数值模拟讨论了重子物质的影响。由于模拟体积的限制,不能产生数目足够多、质量足够大的团,我们不得不将团进行缩放处理。通过检验,缩放技术带来的累积发生截面上的误差虽然很大,但可以用来研究巨弧数目的相对变化。

我们发现 WMAP3 模型下的预期巨弧数目不会超过 Λ CDM0 模型的 1/5, 以前有许多研究声明 Λ CDM0 宇宙中预期的巨弧数目与观测基本相符。而 WMAP3 的巨弧数目下降得如此之多, 先前这些理论解释将难以适用。例如 Dalal 等人^[17] 预言 Λ CDM0 宇宙中的巨弧数目略低于观测值, 但不会超过 50%, 同样的解释用在 WMAP3 宇宙中则会与观测产生约一个量级的差异。重子的影响是很有限的, 仅有 20%~30% 的提高。虽然恒星形成能够提高巨弧的发生概率, 但是整体看来, 恒星形成对巨弧的产生有两个相反的贡献, 远远不能弥补这个量级上的差异, 这也是以前的工作所发现的^[33]。子结构对于强引力透镜系统的流量反常现象是有贡献的^[34], 对巨弧的数目统计的影响不大, 但也已经被自然地考虑进来了。剩下的只有薄透镜假设忽略掉的星系团外部的大尺度结构的影响, 由于密度很低, 它们的贡献不会超过 20%^[18]。当然对于巨弧统计研究还有很多不确定的因素, 比如背景源的性质的假设, 包括背景源的大小、椭率、星等、面亮度、内禀的光度函数、红移分布等, 观测上同样有不确定性, 如极限星等、视宁度等。这些不确定因素都使得理论和观测难以直接比较。

Gladders 等人^[15] 通过研究 RCS(Red-Sequence Cluster Survey) 发现他们样本中的所有包含巨弧的星系团的红移都大于 0.64, 这同样是 Λ CDM0 模型中的一个难题, 而在 WMAP3 宇宙中星系团形成得更晚, 最可几的透镜的红移必然要比 Λ CDM0 更低, 这也是 WMAP3 要面临的一个问题。

参考文献:

- [1] Spergel D N, Bean R, Dore O, et al. http://xxx.itp.ac.cn/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603449.pdf, astro-ph/0603449, 2006
- [2] Jing Y P, Mo H J, Boerner G. ApJ, 1998, 494: 1
- [3] Yang X H, Mo H J, Jing Y P, et al. MNRAS, 2004, 350: 1153
- [4] van den Bosch F C, Mo H J, Yang X H. MNRAS, 2003, 345: 923
- [5] Tinker J L, Norberg P, Weinberg D H, et al. http://xxx.itp.ac.cn/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603543.pdf, astro-ph/0603543, 2006
- [6] Bacon D J, Massey R J, Refregier A R, et al. MNRAS, 2004, 344: 673
- [7] Van Waerbeke L, Mellier Y, Pello R, et al. A&A, 2002, 393: 369
- [8] Viel M, Haehnelt M G, Lewis A. MNRAS, 2006, 370: L51
- [9] Seljak U, Slosar A, McDonald P. JCAP, 2006, 10: 14
- [10] Rosati P, Borgani S, Norman C. ARA&A, 2002, 40: 539
- [11] Popesso P, Boringer H, Brinkmann J, et al. 2004, A&A, 423: 449
- [12] Gladders M D, Yee H K C, Majumdar S, et al. http://xxx.itp.ac.cn/PS_cache/astro-ph/pdf/0603/0603588.pdf, astro-ph/0603588, 2006
- [13] Luppino G A, Gioia I M, Hammer F, et al. A&AS, 1999, 136: 117
- [14] Zaritsky D, Gonzalez A H. ApJ, 2003, 584: 691
- [15] Gladders M D, Hoekstra H, Yee H K C, et al. ApJ, 2003, 593: 48
- [16] Sand D J, True T, Ellis R S, et al. ApJ, 2005, 627: 32S
- [17] Dalal N, Holder G, Hennawi J F. ApJ, 2004, 609: 50
- [18] Li G L, Mao S, Jing Y P. ApJ, 2005, 635: 795
- [19] Hennawi J F, Dalal N, Bode P, et al. http://xxx.itp.ac.cn/PS_cache/astro-ph/pdf/0506/0506171.pdf, astro-ph/0506171, 2005

- [20] Horesh A, Ofek E O, Maoz D, et al. ApJ, 2005, 633: 768
- [21] Wambsganss J, Bode P, Ostriker J P. ApJ, 2004, 606: L93
- [22] Springel V, Yoshida N, White S D M. New Astronomy, 2001, 6: 79
- [23] Springel V. MNRAS, 2005, 364: 1105
- [24] Jing Y P, Zhang P J, Lin W P. ApJ, 2006, 119: L122
- [25] Kitayama T, Suto Y. MNRAS, 1996, 280: 638
- [26] Bryan G L, Norman M L. ApJ, 1998, 495: 80
- [27] Jing Y P, Suto Y. ApJ, 2002, 574: 538
- [28] Li G L, Mao S, Jing Y P, et al. ApJ, 652: 43
- [29] Kormann R, Schneider P, Bartelmann M. A&A, 1994, 284: 285
- [30] Wu X P, Mao S. ApJ, 1996, 463: 404
- [31] Oguri M, Takahashi K, Ohno H, et al. ApJ, 2004, 597: 645
- [32] Spergel D N, Verde L, Peiris H V, et al. ApJS, 2003, 148: 175
- [33] Dubiski J. ApJ, 1994, 431: 617
- [34] Metcalf R B. ApJ, 2005, 629: 673

The Change of the Giant arcs' number in the three-year WMAP Cosmological Model

LI Guo-liang^{1,2}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: We use high-resolution numerical simulations to investigate the optical depth of giant arcs with length-to-width ratio larger than 7.5 in the 'standard' LCDM model and a model based on the three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) data. We find that the lensing probability in the three-year WMAP model (with $\sigma_8 = 0.74$) decreases by a factor of 5–10 compared with that in the 'standard' LCDM model with $\sigma_8 = 0.9$. The current works show that the predicted number of giant arcs can marginally approach the observations in the 'standard' LCDM model with $\sigma_8 = 0.9$. Our result means it is difficult to produce enough giant arcs in the new WMAP3 cosmological model to consist with the observations. Furthermore, we find that the incorporation of baryons, star formation and feedback processes increases the lensing cross-section by a factor of 1.2–1.3. The increase is only modest because the effect on the cross-section by higher mass concentrations is partially offset by the more spherical shapes in the total mass distributions. Although there are still some uncertainties in the simulation including baryon process, such level of baryon contribution was also confirmed by many other works. And usually, such a contribution maybe over-estimated for the over-cooling of gas. We conclude that the low central value of σ_8 and mass density $\Omega_{m,0}$ preferred by the WMAP three-year data is too low to be compatible with observations if assumptions of the background source population are correct.

Key words: astrophysics; cosmology; galaxy clusters; gravitational lensing