

# 宇宙在大尺度上是均匀的吗？

朱 杏 芬      褚 耀 泉

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

## 摘 要

宇宙中的物质在大尺度上是均匀分布的，还是保持着分形分布的特点，成为近年来观测宇宙学中争论的一个热点。Pietronero 等人认为直到目前观测到的最大尺度 ( $\approx 1000h^{-1}\text{Mpc}$ ) 星系的分布仍保持  $D \approx 2$  的分形结构，而大多数坚持标准模型的宇宙学家都认为宇宙在大尺度上是均匀分布的。宇宙物质在大尺度上是否均匀分布，将由下一代的红移巡天的结果来判断。

关键词 宇宙大尺度结构 — 星系平均密度 — 分形

分类号：P159

## 1 争论的焦点

现代宇宙学的基本出发点是宇宙学原理，即宇宙在空间上是均匀与各向同性的<sup>[1]</sup>，由此导出 FRW 度规，建立起标准大爆炸宇宙学模型。赞同标准宇宙学模型的人都不会怀疑宇宙在大尺度上是完全均匀的。但是我们观测到的宇宙中以星系为代表的发光物质的分布，从星系群、星系团、超星系团、空洞直到宇宙长城 (Great Wall) 却是相当不均匀的。如果认为星系的分布代表了宇宙中物质的分布，通常的解释是在更大尺度上星系将是均匀分布的。考虑到目前观测到的星系结构已达  $170h^{-1}\text{Mpc}$ ，而我们今日视界的尺度也只有  $6000h^{-1}\text{Mpc}$ ，我们有理由追问果真存在着一个“更大尺度上均匀”的宇宙吗？这个尺度到底是多大？

最近这场争论又一次成为宇宙学研究中的一个热点<sup>[2,3]</sup>。近年来大量的观测事实证明在我们附近的宇宙 ( $< 100h^{-1}\text{Mpc}$ )，星系的分布是不均匀的。呈现出分形 (fractal) 的特征。争论的焦点是宇宙中的物质在超过星系团的更大尺度上是继续保持着与小尺度上同样的分形结构，还是在大尺度上趋向于均匀分布？

在星系的分形分布模型中，对宇宙中任一点我们可以计算与该点距离为  $R$  的范围以内的星系计数  $N(< R)$ ，如果满足  $N(< R) \propto R^D$ ，则当  $D < 3$  时我们称之为分形结构， $D$  称之为分形的维数；当  $D = 3$  时，则星系为均匀分布。Pietronero 等人的工作<sup>[4,5]</sup>表明，在直到约  $1000h^{-1}\text{Mpc}$  的尺度上  $D \approx 2$ ，因此宇宙中星系的分布在所有尺度上都是分形的。而另一批

研究者<sup>[6,7,2]</sup>认为  $D$  是随尺度而变化的, 他们认为在小尺度上 (几十 Mpc 以下)  $D$  在  $1.5 \sim 2$  之间, 物质是分形分布的, 在大尺度上 (几百 Mpc 以上)  $D$  趋向于 3, 也就是说宇宙在大尺度上是均匀的。

## 2 星系的平均密度

与宇宙大尺度上均匀与否相关的一个问题是宇宙中星系的平均密度。在标准的宇宙学模型中, 宇宙的平均物质密度是一个重要而确定的常数。但是在分形结构模型中平均密度只有在某一个给定的巡天范围内才有意义, 就宇宙整体而言, 平均密度趋向于 0。因  $M(r) \propto r^D$ , 当  $D < 3$  时,  $n(r) \equiv M(r)/V(r) \propto r^{D-3}$ , 则  $r \rightarrow \infty$  时,  $n(r) \rightarrow 0$ 。在标准的宇宙学模型中, 在半径  $r$  范围内任何一点观测到的星系的数密度可以用相关函数  $\xi(r)$  来表示:  $n(r) = n(1 + \xi(r))$ 。观测结果表明,  $\xi(r)$  满足幂律关系:  $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$  ( $r_0 \approx 5h^{-1}\text{Mpc}$ ,  $\gamma = 1.8$ )。在小尺度上,  $\xi(r)$  满足幂律关系, 与分形结构一致,  $D = 3 - \gamma$ ; 在大尺度上,  $\xi(r) \rightarrow 0$ ,  $D = 3$ ,  $n(r) = M(r)/V(r) \rightarrow$  常数, 星系趋向于均匀分布。

如果星系的分布确实在任何尺度上都保持着分形的结构, 那么就会导致标准宇宙学模型的基础发生动摇。宇宙中不存在一个确定意义上的平均密度, 物质分布也不是连续的, 物理学家所熟悉的建立在解析函数和微分方程等数学方法上的研究模式就必须改变, 这对宇宙学将是一个非常严重的挑战。需要强调的是, 分形模型对宇宙学原理给出了更为普遍的解释, 即宇宙中的任一点都是等价的 (不存在任何特殊的空间点, 如宇宙的中心)。在分形模型中从任何一点上观测者看到的宇宙都是各向同性的, 即观测者在各个方向上看到的都是同样的物质结构的混合 (统计上的各向同性), 但这并不意味着物质是均匀分布的。

## 3 分形分布的证据

20 世纪 80 年代以来一大批星系红移巡天工作的完成, 使天文学家惊奇地发现, 与星系在天空中二维投影分布相当均匀的表象相反, 星系在三维空间中的分布是极不均匀的, 存在着巨大尺度的结构和空洞。与此同时, Peebles 等人发展了一整套相关函数统计方法, 得到相关函数满足幂律关系  $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$ 。其中  $r_0$  称之为“相关尺度”, 其数量级为  $r_0 = 5h^{-1}\text{Mpc}$ 。Pietronero 等人指出, 尽管在观测上早已发现的结构达到  $170h^{-1}\text{Mpc}$ , 而宇宙学家们仍然接受的星系分布相关尺度为  $5h^{-1}\text{Mpc}$  是成问题的。通常在计算相关函数时以样品的“平均密度”  $n$  为基础, 即  $\xi(r) = \langle n(0)n(r) \rangle / n^2 - 1$ , 所谓的“相关尺度”满足  $\xi(r_0) \equiv 1$ 。而真实的相关尺度应该定义为  $\lambda_0$ , 超过这一尺度星系的分布将从分形转为均匀分布。如果星系确实在大尺度上均匀分布, 则  $r_0 \cong \lambda_0/2$ ; 如果星系在所研究样品范围内都是分形分布的, 则  $r_0$  与  $\lambda_0$  无关,  $r_0$  并不反映星系分布的特征, 而仅仅是与巡天样品尺度有关的一个量<sup>[8]</sup>。

Pietronero 等人认为文献中大量的对星系分布的相关分析方法实际上都是先验地认为存在着这样一个“平均密度”, 这就很成问题。正如上节分析中指出, 如果星系分布确实是分形的, 则“平均密度”并不是一个确定的量, 它随着巡天的尺度而变化。而实际从事过统计分析工作的都知道, 确定一个样品的“平均密度”是很困难的。

Pietronero 等人指出, 正确的分析方法一定要避免先验地引入“均匀分布”的假定, 例如

他们采用条件密度 (Conditional density)  $\Gamma(r) \approx \langle n(0)n(r) \rangle$  方法<sup>[8,5]</sup> 对主要的星系红移巡天样本进行了分析, 其结果列于表 1<sup>[4]</sup>。

表 1

巡天样品 名称	巡天天区范围 $\Omega$ (立体角)	$R_d$ / $h^{-1}$ Mpc	$R_s$ / $h^{-1}$ Mpc	$r_0$ / $h^{-1}$ Mpc	分形维数 $D$	$\lambda_0$ / $h^{-1}$ Mpc
CfA1	1.83	80	20	6	$1.7 \pm 0.2$	$> 80$
CfA2	1.23	130	30	10	2.0	?
Perseus-Pisces	0.9	130	30	10	$2.0 \pm 0.1$	$> 130$
SSRS1	1.75	120	35	12	$2.0 \pm 0.1$	$> 120$
SSRS2	1.13	150	50	15	2.0	?
Stromlo-APM	1.3	100	30	10	$2.2 \pm 0.1$	$> 150$
LEDA	$4\pi$	300	150	45	$2.1 \pm 0.2$	$> 150$
LCRS	0.12	500	18	6	$1.8 \pm 0.2$	$> 500$
IRAS 1.2Jy	$4\pi$	80	40	4.5	$2.0 \pm 0.1$	$\approx 25$
ESO Slice Project	0.006	700	10	5	$1.9 \pm 0.2$	$> 800$

在表 1 中  $R_d$  表示巡天的深度,  $R_s$  为该巡天星表中所包括的最大球体的半径, 代表该巡天样品统计有效的最大尺度,  $r_0$  为  $\xi(r) \equiv 1$  的尺度,  $\lambda_0$  表示星系样品转为均匀分布的尺度。从表 1 中可以清楚地看到, 对不同样品的统计结果相当一致, 即从几 Mpc 直到目前观测到的最深的巡天样品 ( $\approx 1000h^{-1}$ Mpc) 都具有同样的分形维数  $D \approx 2$ , 并对所有样品而言,  $\lambda_0$  都大于样品的深度, 换句话说, 目前观测到的样品深度都没有达到星系均匀分布的尺度!

#### 4 支持大尺度上均匀的理由

支持标准宇宙学模型是当前宇宙学研究中的主流, 他们承认在小尺度上星系的分布是分形结构, 但认为目前的观测资料正在逐步表明更大尺度上  $D$  将趋向于 3, 也就是说在大尺度上物质分布是均匀的。Martinez<sup>[9]</sup> 分析了 Stromlo-APM 样品得到  $D = 2.7 \sim 2.9$ ; Scaramella<sup>[7]</sup> 分析了 ESO Slice Project 样品得到  $D \approx 2.9$  的结果; 这都被认为是支持大尺度上均匀的直接证据。

为什么对同样的样品会得出绝然不同的结果呢? 这正是观测宇宙学的一个老问题。统计分析工作的出发点是要有一个“完美的样品 (fair sample)”, 但是实际上获得的星系红移样品都有各种各样的选择效应。目前我们得到的红移巡天样品由于受到望远镜观测时间的限制不是太浅, 就是巡天的天区只限制在很小的区域 (所谓的一维、二维巡天)<sup>[10]</sup>, 加上对星系选择方法上的不同、银河系吸收和星系际吸收改正的不确定性等因素, 以及不同的研究者采用不同方法对实际星系红移巡天样本进行不同的修正, 往往得到不同甚至互相矛盾的统计结果。正是由于这种观测上的限制, 推动天文学家不断努力, 去探索宇宙中更深的空间。

除了等待进一步更大更完美的红移巡天样品外, 为了填补当地几十  $h^{-1}$ Mpc 到宇宙背景辐射 ( $\geq 1000h^{-1}$ Mpc) 之间的空缺, 人们也研究一些高红移天体的空间分布。例如射电星系, 其平均红移为  $z \approx 1$ , 研究表明它们表现出很好的各向同性分布, 它们与在约  $600h^{-1}$ Mpc 尺度上均匀分布是一致的<sup>[11]</sup>。X 射线背景辐射被认为是高红移的 AGN 产生的, 它们的分布也

支持大尺度上的物质为均匀分布<sup>[12]</sup>。另外对类星体、高红移星系及 Ly- $\alpha$  吸收线的空间分布方面都进行了研究。另一方面,理论上研究的是宇宙中的物质分布,我们知道在宇宙中大部分物质是不发光的暗物质,我们探测到的发光的星系与不发光的暗物质之间到底是什么关系,一直是观测宇宙学上的关键问题。目前提出的偏袒模型(bias)正是试图在这两者之间建立起某种关系,观测结果也揭示了一些偏袒的效应,例如对于不同类型不同光度的星系、不同富度的星系团等都显示出空间成团分布上不同的相关尺度。当然探测暗物质的空间分布的直接方法,是通过引力作用效应。但研究表明,对于引力透镜效应目前还无法探测大于  $20h^{-1}\text{Mpc}$  尺度以上的物质分布。原则上讲研究星系的本动速度(peculiar velocities)可以用来探测宇宙中物质的不均匀分布,正如人们发现 Great Attractor 时所做的那样。但我们知道,测定本动速度取决于能否找到一种可靠的不依赖于红移的星系视向速度测定方法,而当前人们所掌握的方法,在大于  $20h^{-1}\text{Mpc}$  距离上就变得很不可靠,因此尽管在这方面已有了不少研究结果,争议仍非常大。

## 5 预 言

正如宇宙学中许多热点问题一样,宇宙在大尺度上是否均匀的争论,至今争论双方均缺乏判断性的证据,大家把希望寄托在下一代星系红移巡天上。在 1996 年普林斯顿举办的“Critical Dialogues in Cosmology”会议上,支持大尺度均匀的 Davis 教授与认为宇宙大尺度上是分形结构的 Pietronero 教授以一瓶葡萄酒为赌注,预测 SDSS 巡天结果将得到的  $r_0$  是大于(Pietronero)还是小于(Davis)  $r_{0\text{cfa}}(R_{\text{SDSS}}/R_{\text{cfa}})^{1/2}$ , 其中  $r_{0\text{cfa}}$  表示从 cfa 星表中测出的  $r_0$ ,  $R_{\text{SDSS}}$  与  $R_{\text{cfa}}$  分别代表相应巡天中所包括的最大球体的半径。

对此人们不禁想起在 Hubble 空间望远镜升空以前,天文学家曾乐观地认为空间望远镜一定能一举确定  $H_0$  常数。但是通过数年的努力,利用 Hubble 望远镜得到的资料,测定的哈勃常数值  $H_0$  仍存在矛盾,只是双方似乎稍稍接近了一些。同样我们也会怀疑下一代的红移巡天是否真能对此得到判断性的结果,也许人们对这一类宇宙学的关键问题仍会不断地争论下去。

## 参 考 文 献

- 1 温伯格 S. 引力论和宇宙论. 邹振隆等译. 北京: 科学出版社, 1980
- 2 Wu K, Lahav O, Rees M. Nature, 1998, 397: 225
- 3 Davis M. In: Turok N ed. Critical Dialogues in Cosmology, Singapore: World Scientific, 1997: 13
- 4 Pietronero L, Montuori M, Labini F. In: Turok N ed. Critical Dialogues in Cosmology, Singapore: World Scientific, 1997: 24
- 5 Labini S, Montuori M, Pietronero L. Phys. Rep, 1998, 293: 61
- 6 Borgani S. Phys. Rep. 1995, 251: 2
- 7 Scaramella R et al. Astron. Astrophys., 1998, 334: 404
- 8 Coleman P H, Pietronero L. Phys. Rep. 1992, 231: 311
- 9 Martinez V L et al. M.N.R.A.S., 1998, 298 1212
- 10 褚耀泉, 朱杏芬. 天文学进展, 1998, 19(2): 150
- 11 Baleisis A et al. M.N.R.A.S., 1998, 300: 257
- 12 Treyer M et al. Ap. J., 1998, 509: 531

## Is the Universe Homogeneous on Large Scale?

Zhu Xingfen    Chu Yaoquan

(Center for Astrophysics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

### Abstract

Whether the distribution of matter in the Universe is homogeneous or fractal on large scale is vastly debated in observational cosmology recently. Pietronero and his co-workers have strongly advocated that the fractal behaviour in galaxy distribution extends to the largest scale observed ( $\approx 1000h^{-1}\text{Mpc}$ ) with the fractal dimension  $D \approx 2$ . Most cosmologists who hold standard model, however, insist that the universe be homogeneous on large scale. The answer of whether the Universe is homogeneous or not on large scale should wait for the new results of next generation galaxy redshift surveys.

**Key words** large scale structure in the Universe—mean density of galaxies —fractal distribution