

# COBE 以后宇宙大尺度结构的研究<sup>\*</sup>

褚耀泉 朱杏芬

(中国科学技术大学天体物理中心 合肥 230026)

## 摘 要

介绍了近几年来在研究宇宙大尺度结构方面巡天样品、统计分析方法以及理论模型等方面的新进展。

80年代宇宙大尺度结构的研究取得了一系列重大成果,在观测上发现了“空洞”、“巨吸引体”、“宇宙长城”等一系列出乎预料的新现象;在理论上冷暗物质(CDM)模型成为主导研究方向的标准模型。尤其80年代末COBE卫星第一次观测到宇宙微波背景辐射的各向异性,又一次把这一领域的研究推向高潮。90年代开始以来,宇宙大尺度结构研究又有哪些新动向?这是大家十分关心的问题。作者根据1993年7月12日在法国巴黎举行的“宇宙速度场(Cosmic Velocity Field)”和1993年6月29日在意大利举行的“星系团和宇宙大尺度结构(Galaxy Cluster and Large Scale Structure in the Universe)”两次国际会议中了解的情况,结合有关文献资料,在此作些介绍。

## 1 新的巡天结果

一个完整的足够大的河外天体巡天样品,一直是研究宇宙大尺度结构的基础。例如,80年代CfA星系红移巡天星表的作用是有目共睹的。综观80年代的工作,随着巡天尺度不断深入,总是发现越来越大尺度的结构,“宇宙长城”的尺度已达150Mpc,而且这一结构横贯巡天区域的两端,明显地受到巡天尺度的限制。一个很自然的问题是宇宙中是否还有更大尺度的结构?如果有,那将是对整个宇宙学严峻的挑战。自80年代后期,一系列新的更深的巡天工作逐步展开,有些工作现已接近完成或工作过半。最近在欧洲召开的学术会议上重点介绍了两个巡天工作,其一是由Da Costa等人主持的南天红移巡天(Southern Sky Redshift Survey,简称SSRS2),这是把CfA 2巡天扩展到南天,视星等极限为 $m_V \sim 15.5\text{mag}$ ,观测范围为 $-40^\circ < \delta < -2^\circ.5$ ,  $b < -40^\circ$ ,总计有3600个星系,目前已观测了近90%的样品,其主要结论是发现“空洞”与“宇宙长城”等结构是宇宙中相当普遍存在的现象,总体特征与CfA2非常相似,对样品进行光度函数、功率

<sup>\*</sup> 本文根据作者在“星系团专题讨论会”(1993年10月20—23日,浙江镇海)上的综述报告修改、扩充而成

1993年11月23日收到

谱分析等结果也表明与 CfA2 一致。其二是 V. de Lapparent (CfA2 的主要参加者之一) 在法国巴黎天体物理研究所主持了另一项暗星系的巡天工作, 即 ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey。其目标是极限星等为  $R \leq 20.5 \text{ mag}$  (相当于  $Z \leq 0.6$ ) 的深度巡天, 巡天范围在南银极 (SGP) 附近  $2^\circ \times 0^\circ.2$  的天区, 目的是研究宇宙中最大空洞的尺度到底有多大? 根据 CfA2 的结果推测, 他们认为可以穿过大约 30 个空洞, 目前已完成 80% 的成像工作和 30% 的红移测量。其主要结论为直到红移高达  $Z \sim 0.6$ , 星系的分布特征与我们附近空间中星系的分布非常相似。据初步资料分析, 宇宙中最大的空洞尺度的数量级不超过 100Mpc。另一个有意义的发现是在他们的样品中将近 50% 的星系具有发射线, 这将对 AGN 现象的研究提供新的线索。

总之, 根据目前已经发表和正在进行的巡天结果, 似乎有越来越多的证据显示, 宇宙中没有数量级超过 100Mpc 的更大尺度上的结构。

会上还介绍了其他一些引起我们注意的巡天工作。如加拿大的 Hickson 报告了利用 2.7m 液体镜面望远镜 (Liquid Mirror Telescope, LMT) 所进行的 UBC/Lavel Faint Galaxy Survey, 他们用  $2k \times 2k$  的 CCD 探测器对 20 平方度天区进行窄波段的多色测光观测, 共采用 40 多个滤光片, 极限星等达  $m_V < 21 \text{ mag}$ , 估计样品总数为  $10^5$  个星系, 近二三年内就能完成。此外, 对星系团系统的红移巡天工作也有多个研究小组正在进行之中, 包括 ESO 的 Key Program。他们在每个星系团中测量更多的成员星系的红移值, 以求得到更可靠的星系团的平均红移值和对星系团的动力学性质作深入了解。

## 2 新的统计和分析方法

对于大批新的巡天观测资料, 如何寻找和发展更有效的分析统计方法, 从而得到描述大尺度特征更可靠的物理参量, 一直是这一领域中十分重要的课题。迄今为止广为采用的  $n$  点相关函数方法, 尽管仍为最基本的方法, 但也暴露出不足之处, 譬如由于它依赖于样品的平均密度而有较大的误差, 并且在大尺度上往往失效。同时它本质上是一种对样品整体性质进行分析的方法, 因此对河外天体分布中一些特殊的结构形态如细丝状结构很不敏感, 也无法得到拓扑结构等重要信息。近年来一系列不同的统计分析方法迅速地发展起来, 例如功率谱 (power spectrum) 方法, 分形方法 (fractal and multifractal)、空洞概率 (void probability)、团分析 (cluster analysis) 等。这些方法各有其特点, 在此我们不作仔细探讨。

当前, 有一个值得注意的动向是小波分析 (wavelets) 方法开始应用到大尺度结构研究之中。这种方法早已被广泛应用到科学技术的各个领域<sup>[3]</sup>, 特别在图像处理方面是一种强有力的工具, 在天文观测资料的处理方面也已崭露头角。

小波分析实质上是 Fourier 分析的发展, 通过选择适当的分析小波 (analyzing wavelet)  $g(x)$  把所研究的信号函数  $f(x)$  分解成一组函数:

$$h(x, a) = f(x) \otimes \frac{1}{a^{1/2}} g\left(\frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

其中  $a$  为尺度变量 (scale variable),  $h(x, a)$  的值可以同时空间 ( $x$ ) 和尺度 ( $a$ ) 上来描述  $f(x)$  的性质。目前已有一些研究人员开始用小波分析来研究星系的分布特征和星系团中的子结构<sup>[4-6]</sup>。小波分析方法由于具有充实的数学基础以及广泛的应用, 导致在方法上飞速发展, 它必将在大尺度结构研究中发挥越来越重要的作用。

针对在研究大尺度结构中的具体问题, 天体物理学家也发展了一批特有的分析方法。例如 Dekel 等人发展的“POTENT”程序, 通过对河外天体本动速度场 (peculiar velocity field) 的分析求得宇宙中引力势的分布图<sup>[7,8]</sup>。其特点在于利用引力不稳定性理论克服观测上只能测量到本动速度在视线方向上分量的限制。这种方法把星系作为标志速度的指示天体, 因此得到的宇宙中物质分布同时包含了发光物质和暗物质, 避免了如何假定光线表征物质的难题, 这正是通常用三维红移巡天星表来直接得到密度分布时难以确定的因素。

对巡天资料进行分析统计, 并与理论模型进行比较, 这正是我们可以大有作为的领域。国际上这方面的工作十分活跃, 成果也很多, 在 9th IAP Astrophysical Meeting 上有八组研究人员对不同样品用不同方法得到了  $\Omega$  值的不同结果, 见表 1。看来, 最近报道的  $\Omega$  似乎都趋向较大的值, 这也许是这一领域中的一种时髦 (fashion) 吧!

表 1 对  $\Omega$  值的测定

作者	样品 / 采用方法	$\Omega^{0.6}/b^*$	$\Omega$
Dekel et al.	IRAS/POTENT	$1.3^{+0.8}_{-1.6}$	
Dekel et al.	Voids/POTENT		>0.3
Davis	IRAS/ 相关函数不对称性	0.45	
Fisher	IRAS/ 功率谱	$1.0 \pm 0.3$	
Hudson	光学巡天资料 Mark III catalogue	$0.5 \pm 1$	
Kaiser	QDOT/ $V_{pec}$	$0.7 \pm 1$	
Roth	IRAS	$0.5 \pm 0.15$	
Shaya	group of galaxies/least action solution	$0.4 \pm 2$	

\*  $b$  为偏袒因子 (biasing parameter)

### 3 理论研究的新动向

80 年代末期人们逐渐认识到, 尽管标准的冷暗物质模型 (CDM) 对解释小尺度上的成团十分成功, 但是在较大尺度上 (大于几十 Mpc) 遇到了困难, 这就是所谓 “extra power on large scale” 的问题。近年来, 为了使模型能较好地符合观测到的大尺度上的成团现象, 以下两方面的动向引人注目。

#### 3.1 增加 (或改变) 宇宙中物质的成分

宇宙中包含什么样的物质成分是大尺度结构形成模型的基本出发点。在标准宇宙学模型下, 根据早期核合成理论可以确定重子物质的成分必定满足:  $0.01 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.015$ 。但是观测宇宙学中各种直接测定的  $\Omega$  值都大于上述值, 暴涨宇宙学模型更是要求  $\Omega=1$ , 因

此可以肯定宇宙中必定存在着非重子暗物质。冷暗物质 (CDM) 模型和热暗物质 (HDM) 模型便应运而生,但它们都有与观测结果不符之处: CDM 模型对小尺度结构符合较好, HDM 模型在描述大尺度成团方面有长处。自然人们会想到可以把这两种模型结合起来,这就导致了有多种成分暗物质的模型,即 Mixed DM 或 Hybrid 模型。这方面研究成果很多<sup>[9,10]</sup>,比较成功的是含有 70% 的 CDM 和 30% 的 HDM 模型。然而人为地把两种暗物质调配在一起,理论上显得很不自在,有人就企图从粒子物理出发来寻找冷热暗物质三七开的机制。例如 Kaiser 报告了一种建立在相对论性  $\gamma$  衰变上的模型,以期自然地产生这种多成分的混合。在宇宙模型中增加宇宙常数 ( $\Lambda \neq 0$ ) 是另一种可能的解决方案<sup>[11]</sup>,  $\Lambda$  被解释为宇宙早期真空背景的贡献,使  $\Omega + \Omega_\Lambda = 1$ 。根据现在对宇宙年龄的测定,如果最终测定哈勃常数  $H_0 \geq 70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ , 则宇宙常数  $\Lambda \neq 0$  看来是无法避免的。

还有人甚至怀疑宇宙中是否一定存在着如此多的暗物质,为此提出了低密度宇宙模型 ( $\Omega \ll 1$ )。例如 Peeble's 提出的 PBI 模型 (Primeval Baryonic Isocurvature)。改变宇宙中物质的成分看来是一种自然的想法,但为此必须付出代价,即理论中引入一些新的参数,理论就显得不太“干净”了,原先 CDM 模型被人称道的优点也就淡化了。

### 3.2 改变原初扰动谱

原初扰动在引力作用下形成今天观测到的大尺度物质分布,这里原初扰动相当于初始条件。为了符合今天的观测事实,有人就在原初扰动上动脑筋,例如把高斯型分布改成非高斯型的 (宇宙弦<sup>[12]</sup>, texture<sup>[13]</sup> 等); 把绝热扰动 (adiabatic) 改为等曲率的 (isocurved) 扰动; 或者改变扰动的谱型, 令  $|\delta k|^2 \propto k^{1-\epsilon}$ , 其中  $\epsilon \geq 0$ , 所谓“倾斜” (tilting) 模型<sup>[14,15,16]</sup>; 或者改变扰动谱的幅度等, 不一而足。还有以非引力作用代替引力作用, 如“爆发”模型<sup>[17]</sup> (explosion), 赝引力模型<sup>[18]</sup> (mock gravity) ……; 或者引入新的机制, 如与尺度有关的偏袒 (scale-dependent bias) 及原初气泡 (primordial bubbles) 等等。

上述种种理论研究新方向, 相当一部分仍是固守在 CDM 模型的框架内, 加上一些修正和改进, 另一些理论学家则干脆另辟捷径, 探讨完全不同的新机制。但迄今为止还没有一种模型能为大多数人所接受。

### 3.3 非线性情况的处理

建立在引力不稳定性基础上的大尺度结构形成理论, 在线性情况下已进行了充分的研究。而早在星系形成之前  $\delta\rho/\rho > 1$ , 因此对于扰动增长的非线性情况是最重要也是最困难的。最常规的办法是利用计算机进行数值模拟。然而由于受到计算机能力的限制, 所采用的模型必然是非常简化的。近年来随着计算机能力的提高和计算方法的发展, 人们开始探索越来越大型和复杂的模拟方法。模拟对象除重子物质、暗物质之外, 还加上气体、辐射等多种成分。Ostriker 等人还加上一些附加条件来确定星系的形成, 以使模拟结果更接近真实世界发生的情况。

在非线性扰动的处理中近似和半分析方法的发展也很迅速。1970 年提出的 Zel'dovich 近似方法被广泛采用后, 人们已发现其不足。Bardeen 等人提出的“高斯随机场”方法曾流行一时。其他处理方法, 如 Lagrangian 近似方法可以把 Zel'dovich 近似看作为一阶近似, 而二阶以上的近似已被用来决定  $\Omega$  值、宇宙速度场等问题, 还有如 Frozen-Flow

approach, Peeble's 等人提出的 least action solution, 或者从物理学的其他领域中借用一些较成熟的方法。这些工作涉及到大量的数学演算, 如何把它们与天文观测事实结合起来, 是今后需要努力的方向。

## 结 语

COBE 结果发表后, 人们很快领悟到它并没有像原先期望的那样对各种理论模型作出最后的判决, 因为迄今为止我们只对可观测宇宙中两个范围有较确切的了解, 即  $z \sim 1000$  的宇宙背景辐射和  $z \sim 0$  时我们附近的星系分布。两者之间的情况我们了解甚少, 这就给各种理论模型留下了很大的余地。显然, 对高红移天体 ( $z=1-5$ ) 的空间分布的研究, 将有可能对形形色色的理论模型作出选择, 这正是我们应该密切关注的方向。同时 80 年代以来建立的一批新的大型设备, 将会提供一些新的观测结果。空间望远镜一旦能在较高的置信度下确定哈勃常数  $H_0$  的数值, 必将对整个宇宙学起到决定性的影响。归根结底, 天体物理学是以观测为基础的, 我们期待着 90 年代宇宙学的发展将再会出现一个新高潮!

## 参 考 文 献

- [1] Bouchet F R, Lachizee-key eds. Cosmic velocity field, The proceeding of 9th IAP astrophysical meeting, Paris: Editions Frontieres, 1993
- [2] Giuricin G *et al* eds. Galaxy cluster and large scale structure in the universe. Trieste, Italy: SISSA, preprints (ref. 86/93/A)
- [3] Chui C K. An introduction to wavelet. Boston: Academic Press Inc., 1992
- [4] Slezak S *et al.* Ap. J., 1993, 409: 517
- [5] Martinez V *et al.* M. N. R. A. S., 1993, 250: 365
- [6] Escalera E, Mazure A. Ap. J., 1992, 388: 23
- [7] Dekel A *et al.* Ap. J., 1990, 364: 349
- [8] Bertschinger E *et al.* Ap. J., 1990, 364: 370
- [9] Davis M, Summers F J, Schlegel D. Nature, 1992, 359: 393
- [10] Klypin A *et al.* Ap. J., 1993, 416: 1
- [11] Efstathion G, Bond J R, White S D M. M. N. R. A. S., 1992, 258: 1
- [12] Bennett D P, Stebbins A, Bouchet F R. Ap. J., 1992, 399: L5
- [13] Silk J, Juskiwieg. Nature, 1991, 353: 386
- [14] Lucchinf F *et al.* Ap. J., 1992, 401: L49
- [15] Davis R L *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 69: 1856
- [16] Scaramella R, Vittorio N. M. N. R. A. S., 1993, 263: L17
- [17] Ostriker J P, Cowie L. Ap. J. Lett., 1981, 243: 127
- [18] Hoggan C J, White S P M. Nature, 1986, 321: 575

---

## The Investigation on Large Scale Structure in the Universe after COBE

Chu Yaoquan    Zhu Xingfen

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

### Abstract

In this paper we give a review on the most recent progress in the new survey samples, statistical and analysis methods and theoretical models on the large scales structure in the universe.