

大天区星系红移巡天

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

星系的红移巡天是观测宇宙学中最基本的工作, 有关宇宙大尺度结构研究中的许多关键问题, 例如宇宙中最大结构的尺度, 宇宙中大尺度结构的拓扑特征, 以及有关宇宙物质分布的密度场和速度场的许多基本性质的研究, 都依赖于覆盖面积足够大、极限星等足够暗的完备的星系红移大样本。通过对巡天的覆盖天区、巡天深度、选样方法、巡样率等方面的分析, 比较了最近已完成的一些红移巡天 (IRAS、CfA、SSRS、ORS 和 LCRS 等) 并对计划中的 2dF 和 SDSS 巡天计划作了简要介绍。

关键词 星系; 红移巡天 — 宇宙学; 宇宙大尺度结构

分类号: P157.2

1 引 言

最近二十年中, 人们对于宇宙大尺度结构的理解有了长足的进展, 这主要是由于对宇宙微波背景的观测和大量星系红移巡天资料的获得。星系的红移巡天, 是观测宇宙学中最基本的工作。我们对于宇宙模型的确定 ($H_0, q_0, \Omega, \Lambda$)、宇宙大尺度物质分布 (相关函数 $\xi(r)$ 、功率谱 $P(k)$ 、拓扑结构...)、星系演化研究, 都离不开一个好的、足够大的、在统计意义上完备的星系红移样本。随着口径越来越大的望远镜投入使用以及探测器和观测技术上的进展, 目前测到红移的星系数目平均每十年增加一个数量级, 表 1 给出了相应的情况及技术上的发展。

表 1

年 代	测得红移星系数	相应技术上的进展
1912	1	照相技术的进步
1915	10	
1930	100	2.5m 级望远镜投入使用
1960	1000	5m 望远镜投入使用
1986	10000	数字化探测器
1993	100000	CCD+ 多目标光纤技术
2000?	1000000	SDSS 巡天
21 世纪初	10000000	LAMOST 计划

2 星系红移巡天与宇宙大尺度结构研究

随着星系红移巡天样本的增加, 人们发现了星系分布大尺度的许多新特征, 例如空洞 (Voids)、星系巨壁 (Great Wall)、大吸引体 (Great Attractor)···, 这些结构的发现完全出乎人们最初的预料, 同时也给研究宇宙大尺度结构注入了强劲的活力。对小尺度范围 ($\leq 15\text{Mpc}$) 星系分布的两点相关函数、功率谱的确定等都获得了较为确切可靠的观测结果。这些都对理论研究、模型的选择加上了很强的限制, 同时象偏袒 (bias)、暗物质等一些新的概念也逐步发展起来。回顾过去二十年的发展, 我们看到尽管对于星系空间分布的了解有了巨大的进展, 但是由于受到红移巡天样本的限制, 人们的知识还是局限在宇宙中很小一部分, 即红移 $z \leq 0.1$ 的“当地宇宙 (local universe)”的情况。个别极小天区的深度巡天 (铅笔束式巡天) 只是提供了一些零星的资料。宇宙大尺度结构研究中尚有许多关键问题, 需要观测上提供更好的红移巡天本来加以回答:

(1) 宇宙中最大的结构到底有多大? —— 在 CfA2 和 SSRS2 巡天中发现的最大结构已伸展到整个巡天区域的边界, 看来 150Mpc 的尺度仅仅是巡天区域的限制, 而不是实际上宇宙中最大尺度结构的上限。同样 120Mpc 尺度周期性分布的证据, 也表明宇宙可能存在着更大尺度上的结构。是否可能随着红移巡天范围的扩大发现越来越大尺度的结构? 什么时候达到极限? 宇宙学原理中大尺度上的均匀各向同性的要求如何与此相一致? 等等。这些问题都需要从观测结果中寻找答案。

(2) 宇宙中大尺度结构的拓扑特征 —— 例如有关超团, 空洞, filament 等物质分布的形态特征方面的研究刚刚开始, 由于目前红移巡天样本中星系数目太少, 离开得到具有统计意义上的确切结论还有许多工作要做。

(3) 宇宙大尺度结构特征与星系物理性质之间的关系 —— 所得到的大尺度结构的特征与采用的星系样本的物理性质是否相关? 例如, 不同类型的星系、不同光度的星系、不同表面亮度分布的星系、有发射线的星系等所展示的物质大尺度分布是否一致? 这些问题直接与星系形成及其环境影响有关。此外, 星系团、类星体等的分布特征是否与星系的分布特征一致?

(4) 不同尺度上本动速度场的幅度有多大?

(5) 星系的分布是否代表了物质的分布? “空洞”中到底存在着些什么?

(6) 星系团的性质 —— 通过对星系团中更多成员的红移测量, 人们希望能更确切地了解星系团的质量及其分布函数、温度函数, 以及星系团的动力学状态。

(7) 宇宙大尺度结构随宇宙时间 (红移 z) 演化吗?

(8) 宇宙大尺度结构研究对宇宙学模型的限制 —— 例如: 暗物质的本质, 宇宙中物质的密度参数 Ω , 宇宙常数 Λ , 宇宙中的大尺度结构确实是由引力不稳定性增长形成的吗? 原初的扰动谱···

3 红移巡天的特征

随着星系红移深度的逐步增大, 测得红移的星系数目越来越多, 但星系本身的性质是十分复杂的, 一个好的红移巡天样本, 应该是能够从中得到较为确切的统计性质的样本, 因此必须是对其“选择效应”有确切和定量了解的样本。一个统计意义上“完备”的样本, 并不是

单纯从字面上理解的把“所有星系”都包括在内的样本，因为实践中这是难以做到的，而是一个确切地知道哪些星系将被观测到，哪些星系可能被遗漏掉的巡天样本。实际上，一个星系红移巡天样本的选择包含下述四方面因素：

(1) 覆盖的天区范围

(2) 选择样本的方法：由于星系本身性质的不同以及观测条件的限制，可以从不同波段上的视星等或星系的直径来选取样本，也可根据星系的面亮度分布特征或是否有发射线等特征来选取样本。

(3) 巡天的深度：样本星系观测量（视星等，大小等）的极限值可能随不同天区有所变化。

(4) 选样率 (sampling rate)：实际已测量红移值的星系占所选全部样本星系的百分比。在确定设计一个新的红移巡天时，上述四方面因素需要统一加以考虑，它们之间是相互影响的，例如：天区的复盖范围和巡天的深度，两者结合在一起决定了巡天的体积。巡天体积越大，样本星系的数目就越多，可得到的信息量也就越多，但是巡天所需耗费的时间就越长。要在尽可能短的时间内，完成具最大科学价值的工作，就是一种战略上的考虑。对于同样的巡天体积，可选择天区较大而深度较浅，也可选择天区较小而深度较深，这就取决于如何充分发挥不同观测设备的特点了。同样的天区范围，也需选取合适的边界形状，即可在天球上选取条形天区，也可选取矩形天区，球形天区；选择分离的随机取样天区，也可是连成一片的天区，这些都将决定巡天样本的形状，并会对以后的统计分析工作带来不同的影响。巡天体积的 Fourier 变换即为在计算大尺度结构的功率谱中的“窗口函数 (window function)”，其作用相当于计算功率谱时的点扩散函数，窗口函数越窄，在计算大尺度成团时灵敏度就越好。

图 1 给出了主要的大天区范围星系巡天的天区复盖范围在天球上的投影，其中所标示的巡天计划将在下文中详细讨论。

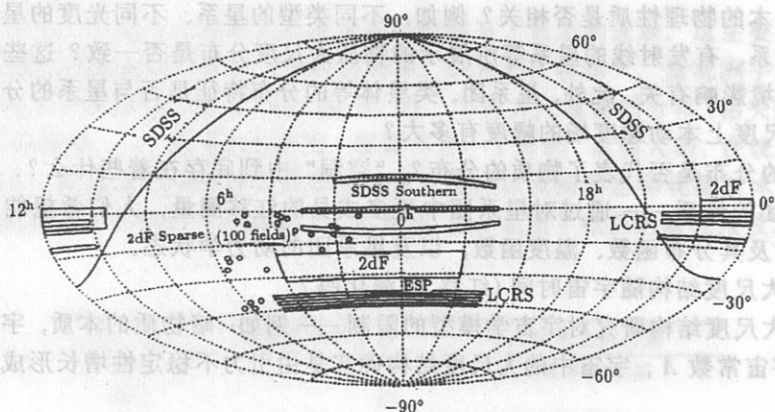


图 1 主要星系红移巡天天区覆盖范围在天球上的投影^[11]

4 当前的大天区红移巡天

本文中主要介绍与宇宙大尺度结构研究关系比较密切的复盖大天区范围的红移巡天。通

常小视场深度巡天(即铅笔束式巡天)更多地侧重于研究星系的演化等课题。

(1) Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies^[1]

这是一个复盖全天区但是很浅的红移巡天,只扩展到 $cz \leq 4000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, 主要是银河系附近的星系。但是它在宇宙学研究中,特别是在研究宇宙本动速度场动力学性质时仍然非常重要。

(2) IRAS(红外天文卫星)巡天

由于 IRAS 巡天覆盖了全天区,银河系中尘埃对于 $60\mu\text{m}$ 辐射又基本是透明的,因此从 IRAS 的 $60\mu\text{m}$ 选择的星系样本基本上是均匀和复盖全天区的。目前主要有两个研究组在做这方面的研究,其一是英国的天文学家^[2],称之为 QDOT 巡天,其极限流量为 0.6 Jy , 选样率为 $1:6$, 共测量 15500 个星系的红移;另一组是 Berkeley 的天文学家^[3],他们在 IRAS Point Source Catalogue 中选样的极限为 1.2 Jy 。IRAS 巡天同样受到在低银纬区域银河系消光的影响(因为无法得到在光学波段看不到的对象的光谱并测量其红移)。此外椭圆星系在大部分红外波段是非常暗的,因此从 IRAS 选出的星系样本中缺乏椭圆星系。

(3) CfA 巡天和 SSRS 红移巡天

CfA 是八十年代十分著名的巡天,“空洞”和“星系巨壁”就是由其发现的,对此已有大量的介绍,只需指出 CfA2 的极限星等为 15.5 mag , 复盖的天区约为 2.95 球面度。SSRS(Southern Sky Redshift Survey)^[4]是把 CfA 巡天扩展到南半球,复盖天区为 $-40^\circ < \delta < -2.5^\circ$, $b < -40^\circ$, 极限视星等也是 15.5 mag , 复盖天区约为 1.13 球面度。CfA2 和 SSRS2 加在一起共测量了约 15000 个星系的红移。

(4) ORS(Optical Redshift Survey)^[5]

这是一个复盖 $|b| > 20^\circ$ 所有天区的红移巡天计划,它从 Uppsala Galaxy Catalogue、ESO Galaxy Catalogue 和 Extension to the Southern Galaxy Catalogue 三个星表中选取星系。ORS 巡天主要分成两个小样本:一是视星等完备到蓝星等 14.5 mag , 另一子样本选取星系的直径大于 $1'.9$, 整个巡天包含 8457 个星系的红移,其中约有 1300 个是新测量的,其它则取自文献。这是一个与 CfA1 巡天深度相同但是复盖天区更大的巡天。

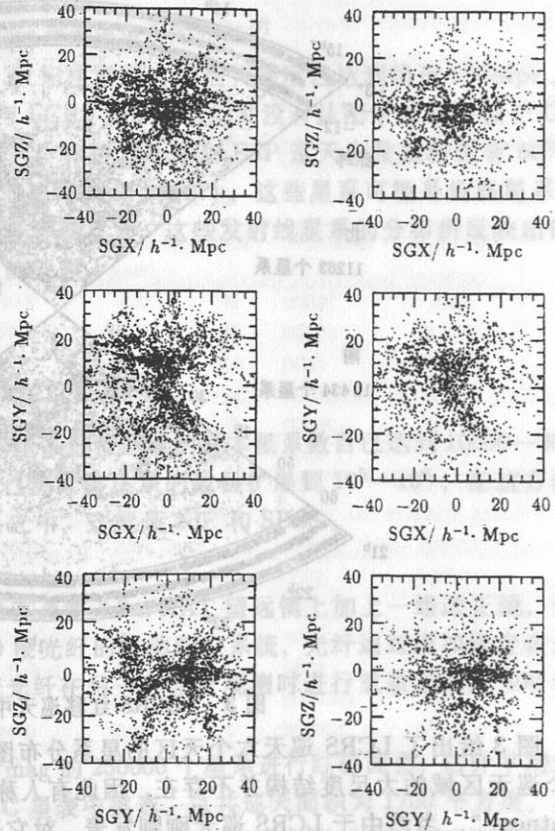


图 2 IRAS(右)和 ORS(左)红移巡天中的星系分布(在标准的超星系坐标中的投影)^[12]

由于样本选自三个不同的星表,其选择效应相当复杂,为此 Santiago 等人花费许多精力来把三个星表合在一起并对银河系的吸收进行修正。ORS 是研究我们周围宇宙中物质分布的一个重要样本。图 2 给出了 IRAS 和 ORS

巡天中星系的分布, 显然两者是非常一致的。

(5) LCRS (Las Campanas Redshift Survey)^[6]

这是最近才完成的目前最大的一个星系红移巡天。它利用 Carnegie Institute 在智利的 Las Campanas 天文台 2.5m 的 Du Pout 望远镜, 选择 $80^\circ \times 1.5^\circ$ 的六条条形天区, 其中三条在北天区, 三条在南天区, 总共天区复盖面积约 700 平方度。选取星等 $r \leq 17.5\text{mag}$ 的星系共 26418 个, 从 1988 年 11 月开始直至 1994 年底完成绝大部分观测。LCRS 巡天的特点是, 它是第一个采用多目标光纤光谱技术得到的红移巡天, 在视场中约为 2° 的尺度上, 以打孔的方式安排 112 根光纤来测量星系的红移。与以前的红移巡天通常采用照相底片资料来选样不同, LCRS 的样本选取是以 CCD 测光资料为基础, 利用在 Las Campanas 的 1m Swope 望远镜上 $2k \times 2k$ Tektronix CCD 加上 Thuan-Gunn r 滤光片来选取星等 $r \leq 17.5\text{mag}$ 的星系作为观测对象, 巡天样本的平均红移值约为 $30000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

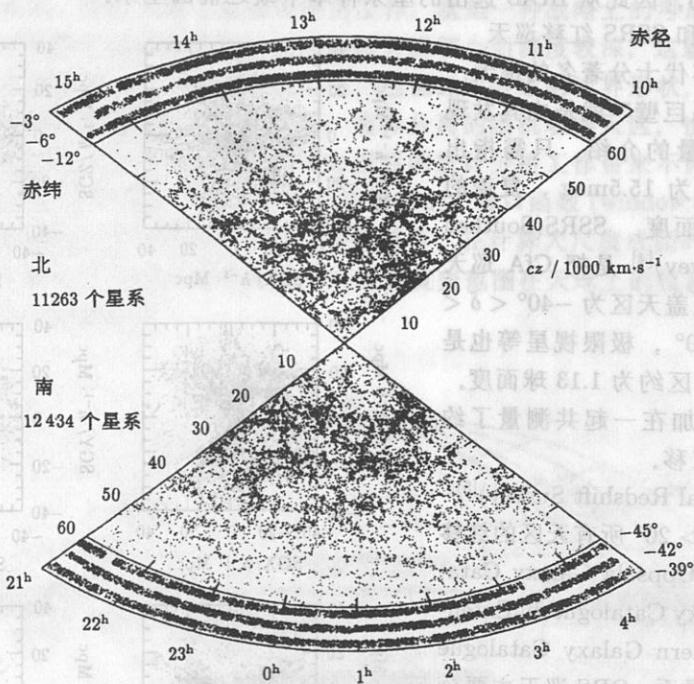


图3 LCRS 红移巡天中星系的分布^[11]

图3给出了 LCRS 巡天六个天区的星系分布图。与 CFA2 比较, 我们可以看到那种贯穿整个巡天区域的大尺度结构并不存在, 因此有人称, LCRS 也许代表着巡天中“the end of greatness”。当然由于 LCRS 巡天刚刚发表, 对它进行统计分析的工作也才开始, LCRS 将对宇宙大尺度结构提供一些什么样的新的信息还需等待一段时间才能见分晓。

(6) ESO Slice Project (ESP)^[7]

ESP 是利用 ESO 的 3.6m 望远镜多目标光纤光谱仪 (Optopus fibre spectrograph) 进行的一个大视场红移巡天, 它覆盖地球上 $32^\circ \times 1^\circ$ 的天区, 样本选自 Edinburgh-Durham Southern

Galaxy Catalogue(EDSGC) 星表中 $b_J \leq 19.4\text{mag}$ 的星系, 共计 3348 个星系, 1991 年开始观测, 目前已接近完成。

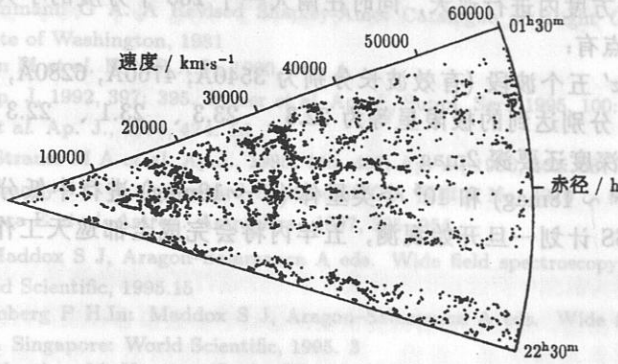


图 4 ESO Slice 巡天中星系的分布 [7]

图 4 给出了 ESP 巡天中星系的分布, 我们注意到它的巡天深度已达到将近 600Mpc, 即相当于下面要提到的 SDSS 巡天的深度。与 LCRS 相似, 我们并没有从图中发现类似于 CfA2 中那种横越巡天边界的大尺度结构。另外一个特别之处是在 ESP 巡天中发现将近有 50% 的星系有发射线 ($[O II]\lambda 3727$, $H\beta\lambda 4861$, $[O III]\lambda 4959$ 和 $\lambda 5007$)。这些星系可能是旋涡星系 (它们的发射线来源于盘中的 H II 区域) 或者是星暴星系。这些发射线星系的分布所反映出的大尺度结构特征, 正是需要进一步深入研究的课题。

5 计划中的重要红移巡天

从上述的介绍中, 我们可以看到现有的星系红移巡天的样本星系数目已达到 10000—20000 左右, 显然红移巡天的下一步发展是要将已测红移星系的数目扩展到 10^5 — 10^6 , 在这方面有两个重要的计划已经开始进行或正在准备之中, 这就是 2dF 和 SDSS。

(1) 2dF^[8]

2dF 计划是“2° 视场”的简称, 它是在英澳 3.9m AAT 望远镜上加上一组改正镜, 使主焦点的视场达到 2°, 同时配备了两套 400 根光纤的自动定位系统, 光纤通过磁扣固定在金属板上。为了节省光纤定位时间, 其中一套光纤在另一套光纤观测时进行重新定位。400 根光纤分成两组分别连接到两个光谱仪上。

2dF 的巡天计划的目标是对 $b_J \leq 19.7\text{mag}$ 的 250000 个星系进行红移测量, 估计平均红移值 (z) = 0.1, 样本星系从 APM 和 EDSGC 星表中挑选。总共巡天面积为 1700 平方度, 其中包括在南银极附近 $75^\circ \times 12.5^\circ$ 和北银极附近 $65^\circ \times 7.5^\circ$ 两条天区。同时在 APM 巡天范围内随机选取 100 个 2° 视场区域, 详细情况参见图 1。

整个计划, 预计 90 个观测夜就能完成。2dF 巡天完成后, 将比 LCRS 更深, 巡天面积扩大了 2.5 倍, 星系的数目增加了 10 倍, 预计在研究大于 $100h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 的大尺度结构中提供更多的信息。

(2) SDSS(The Sloan Digital Sky Survey)^[9]

SDSS 是由美国芝加哥大学、普林斯顿大学、费米实验室等八个单位共同参与的大型计划,它将在新墨西哥州的 Apache Point 建造一个口径为 2.5m 视场达 3° 的望远镜。SDSS 计划在北天极附近 1 万平方度内进行巡天,同时在南天一个 200 平方度的小天区进行深度巡天。SDSS 计划的主要特点有:

对 u' , g' , r' , i' , z' 五个波段(有效波长分别为 3540Å, 4760Å, 6280Å, 7690Å 和 9250Å) 进行精确的测光观测,分别达到的极限星等为 22.3、23.3、23.1、22.3 和 20.8mag(信噪比 $S/N=5$),在南天区深度还要深 2mag。

对 10^6 个星系($r' \sim 18\text{mag}$) 和 10^5 个类星体($g' \sim 19\text{mag}$) 进行中低分辨率(5Å—10Å) 的光谱观测。预计 SDSS 计划一旦开始观测,五年内将会完成全部巡天工作。SDSS 的详情情况可见参考文献 [9]。

6 小 结

从上述介绍中我们可以看到,受到宇宙大尺度结构研究的有力推动,近年来在大视场星系红移巡天方面的发展极为迅速。作为一个小结,我们附上表 2,这是 1996 年在希腊举行的“Wide Field Spectroscopy”专题讨论会上 Colless 在评述报告中给出的。

表 2 近期和计划中的红移巡天^[10]

巡天名称	星系数目	波段	极限星等 /mag	平均红移	望远镜口径 /m	视 场 /平方度	同时观测 目标数
CfA	15000	B	15.5	0.02	1.5	—	1
SSRS	10000	B	15.5	0.02	1.5	—	1
SAPM	1800	b_J	17.2	0.04	2.3	—	1
PSCz	15000	S_{60}	0.6	0.03	2.1	—	1
LCRS	26000	R	17.7	0.10	2.5	1.50	112
ESP	4000	b_J	19.4	0.10	3.6	0.50	50
ESOSc	1000	R	20.5	0.30	3.6	0.70	50
Autofib	1400	b_J	22.5	0.30	3.9	0.70	64
CFRS	760	I	22.5	0.56	3.6	0.02	70
ORS	8500	B	14.5	0.01	1.5	—	1
MRSP	750000	b_J	20.5	0.15	1.2	30.00	15000
2dFb	250000	b_J	19.7	0.10	3.9	2.10	400
2dFf	6000	r_F	21.0	0.30	3.9	2.10	400
SDSS	1000000	g	18.3	0.10	2.5	3.00	640
FLAIR	100000	J	13.0	0.04	1.2	30.00	150
VLTIR	100000	K	21.0	1.00	8.2	0.35	200
LAMOST	1000000	B	20.5	—	4.0	20.00	4000

注: 各个巡天的名称, 详情参见文献 [10]。

表 2 中所示的巡天, 绝大部分已在上文中讨论过, 其余的可以参阅文献 [10]。从表 2 中还可以看到, 由中国天文学家和工程技术专家提出的 LAMOST 计划(大天区面积多目标光纤光谱望远镜) 以其 4m 有效口径, 5° 视场, 配备 4000 根光纤的能力, 将会使大天区红移巡天工作中跨上一个新的台阶。它已经引起了国际天文学界的关注, 有关情况的介绍就超出本文

预定的内容了。

参 考 文 献

- 1 Sandage A, Tammann G A. A Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies, Washington DC: Carnegie Institute of Washington, 1981
- 2 Rowan-Robinson M et al. M.N.R.A.S., 1990, 247: 1
- 3 Strauss et al. Ap. J, 1992, 397: 395. Fisher et al, Ap. J., Suppl. Ser., 1995, 100: 69
- 4 Da Costa L N et al. Ap. J., 1994, 424: L1
- 5 Santiago, B X, Strauss M A et al. Ap.J., 1995, 446: 457; Ap. J., 1996, 461: 38
- 6 Shectman S A, Landy S D et al. Harvard-Smithsonia CfA 预印本 No. 4310, 即将发表在 Ap. J. 上
- 7 Vettolani G, Zucca E et al. Astron. Astrophys., 1997, 325: 954
- 8 Taylor K. In: Maddox S J, Aragon-Salamanca A eds. Wide field spectroscopy and the distant universe. Singapore: World Scientific, 1995.15
- 9 Gunn J E, Weinberg P H. In: Maddox S J, Aragon-Salamanca A eds. Wide field spectroscopy and the distant universe. Singapore: World Scientific, 1995. 3
- 10 Colless, M. In: Kontigas M, Kontigas E eds. Wide field Spectroscopy. Dordrecht: kluwer, 1997: 22
- 11 Strauss M A. In: Apekel Ostriker J P eds. "Structure Formation in the Universe" Cambridge: Cambridge University Press, 1996, in press
- 12 Lahav O. 1996 预印本, astro-ph/9601054

Large Sky Area Redshift Surveys of Galaxies

Chu Yaoquan Zhu Xingfen

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

Abstract

This paper briefly introduces the present and future large sky area redshift surveys of galaxies, which are the fundamental work for observational cosmology. Many key problems about large scale structure, such as the topological characters and the largest scale of the structure in the universe and many basic properties of density and velocity fields as well, depend on the sky coverage and deepness of complete samples of redshift surveys of galaxies. Particularly, we analyze and compare the sky coverage, magnitude limit, criteria of selected sample, sampling rate and so on of the newly finished redshift surveys: IRAS, CfA, SSRS, ORS, LCRS. The proposed 2dF and SDSS surveys have also been discussed.

Key words galaxies: redshift survey—cosmology: large scale structure of universe