

类星体空间成团分布*

褚耀泉

(中国科学技术大学天体物理中心)

提 要

近年来在类星体空间成团分布的研究中取得了一些重要的进展。越来越多的光学巡天样品和类星体星表被认真地进行了空间分布特性的统计分析。研究结果表明在较高的统计置信度水平上,类星体至少在低红移($Z < 2$)和小尺度($< 10 \text{Mpc}$)上是成团分布的。并有证据表明类星体成团特性有随着红移演化的趋向,也可能与类星体自身的性质有关。

一、引 言

类星体的发现确实是现代天文学发展中一件具有深远影响的事件。尽管在近四分之一世纪的时间内经过许多科学家不断努力,已经积累了丰富的资料。但是对于类星体的本质迄今仍有许多未解之谜等待着人们去探索。可以预见在将来相当长一段时间内类星体的研究仍将是天体物理领域中一个十分活跃的课题。从宇宙学的角度看,类星体仍是目前人们所能观测到的最遥远的天体,在研究宇宙演化的历史中扮演着不可替代的关键角色。众所周知,高度各向同性的宇宙背景辐射表明宇宙中物质分布在早期($Z \sim 1000$)是均匀的,而现今($Z \sim 0$)物质的分布却是高度成团的,迄今观测到的各个层次的天体都有明显的成团倾向:星系、星系团、超星系团、空洞……等等。目前,在宇宙大尺度结构的研究中十分突出的问题是:是否存在着比超星系团更大尺度的成团性(即尺度在 $50 \text{Mpc} \sim 100 \text{Mpc}$ 以上)?这些大尺度结构是何时和如何形成的?它们是如何随着时间演化的?……等等。因此,对于红移处于星系和宇宙背景辐射之间的类星体的空间分布的研究,已成为解决这一系列问题的关键。由于类星体是较早形成的天体,因此在类星体的空间分布中也许更多地保留着一些宇宙极早期物理过程(例如:相变、暴涨,宇宙弦等)的痕迹。另一方面,对类星体本质的研究而言,类星体空间分布对于它形成时的环境以及自身的物理性质都会提供重要的信息。这一切都说明了为什么近年来对于类星体空间分布的研究越来越引起天体物理学家和宇宙学家关注的原因。

对于类星体空间成团分布的系统研究开始于八十年代。由于大量类星体巡天结果的发表和在大尺度结构形成理论方面的深入发展,这方面的研究近年来进展极为迅速。有关的结果已多次在国际天文学联合会学术讨论会上系统地总结过。读者可参阅褚耀泉、方励之在IAU Symp. No. 124^[1]和 Shaver 在IAU Symp. No. 134^[2]上的综述文章。本文只着重总结近

* 国家自然科学基金资助项目。

1988年12月5日收到。

一、二年的重要进展。

迄今为止分析类星体成团分布的方法基本上有两类：一是利用小天区中完整的类星体样品(通常是光学巡天的样品)与随机分布的均匀样品进行比较；另一类是利用像Hewitt-Burbidge之类的类星体总表，通过寻找类星体对的方法来探测成团特性。下面我们分别介绍这两方面的研究成果。

二、对光学选类星体样品的分析

八十年代以来，利用光学方法寻找类星体的技术发展极为迅速。无缝光谱、UBV色指数、多色测光、计算机自动搜索……等对于发现类星体都是非常有效的方法，从而使类星体的数目成倍地增加。在表1中我们列出了一些主要的光学巡天类星体样品，对这些样品，不同作者都进行过空间成团分布的分析，并且发现了成团分布的证据。

由于计算机和计算技术的发展，使对大量数据的处理变得实际可行。由此天文学家对大量的类星体或类星体候选者进行了一维、二维和三维分布的统计分析。目前最为普遍的方法

表 1 发现类星体成团分布的统计结果

巡天名称	巡天技术	面 积	类星体 数 目	视星等 极 限	红移范围	成团分布 统计结果	作 者
S. B. 02 ^h , -50°	prism +UVX	5°×5°	116	20.0	Z<2	弱~2σ	Chu, Zhu(1983) ^[3] Boyle et al(1983) ^[4]
			62			100Mpc ~150Mpc	Fang, Chu, Zhu ^[6] (1985)
S. B. 22 ^h , -18°	prism +UVX	5°×5°	57	20.0	Z<2	100Mpc ~150Mpc	Fang, Chu, Zhu ^[6] (1985)
SGP	UVX	11.5deg ²	293 candi	20.0		"2-8" 3.9σ	Shanks et al. ^[6] (1983)
		6×(4°.5 ×4°.5)	172	21		<10Mpc	Shanks Fong ^[7] et al. (1987)
01 ^h 12 ^m -35°	prism +UVX	5°.7×5°.3	325			弱	Savage et al. ^[8] (1984)
9组样品组 合*	prism grens Radio	-	629	-	0<Z <1.5	强	Kruszewski ^[9] (1987)
3组样品组 合§	UVX grens prism	-	376	-	Z<1.5	<10Mpc 4-5σ	Iovino and ^[10] Shaver (1988)
S. A. 94	prism +UVX	6°×6°	350 candi			<0.4deg	Chu, Barbieri ^[11] (1986)
1 ^h 44 ^m -40° 00'	prism +UVX	40deg ²	1092 candi	21.0		弱 ~35Mpc	He, Chu et al (1987)
NGC 450	UVX	25deg ²	140			弱	Cosset, Surdet ^[12] Swings(1985)

* 9组样品取自Palomar-Green, CTIO, CFHT, 3C, 4C and PKS 巡天。

§ 3组样品取自Boyle et al. (1986), Barbire et al. (1987) and Crampton et al. (1987)。

是计算相关函数 (correlation function), 它把观测样品与随机样品进行比较, 计算在一定间距内类星体对的数目之比。相应的随机样品通常由电子计算机产生并使它尽可能地与观测样品具有相同的选择效应(即两者在红移与天球上的分布特征尽量一致)。由于相关函数方法已广泛地应用到星系分布的统计工作之中, 对这种方法的优缺点了解得比较多, 而且也有利于把星系的分布与类星体的分布直接进行比较。此外, 由于类星体的成团相对于星系而言更为微弱, 因此除了相关函数方法以外, 还发展了一些有利于检测出弱成团的更为灵敏的统计方法, 例如: 功率谱方法(power-spectrum analysis)和最近邻检验(nearest neighbor test)等等。后者的基本思想是把样品中类星体的平均间距与随机样品的平均间距进行比较。最近邻检验实际上是相关函数方法的一个补充, 因为在某一间距上没有找到一对类星体的几率依赖于所有各阶相关函数的值。这两种方法的不足之处在于不能给出成团的具体形式。近来 Zeldovich 和他在苏联的研究小组推荐一种渗透方法(percolation test), 是从其他研究领域中引进的, 其特点是可以确定团的几何形态。

为了增加类星体样品的数目以提高统计结果置信度, 近两年来出现了把几个天区的巡天样品组合起来一起考虑的倾向。Iovino 和 Shaver^[10]以及 Shanks 等人^[7]把这种方法应用到两个各含 376 和 354 个类星体的较大样品中, 都发现在共动距离 $< 10h^{-1} \cdot \text{Mpc}$ 尺度上能检测出类星体团, 统计置信度达 $4-5\sigma$ 。Kruszewski^[9]分析了九组样品组合, 也得到类似的结果。

当然, 类星体的成团性远不及星系那样引人注目。有关的争论至今仍未结束。另外, 一些研究者对他们的样品进行分析后, 并没有发现类星体成团性。统计结果表明这些样品或者与随机均匀分布的样品没有区别, 或者只是在 $1-2\sigma$ 水平上的差异。在表 2 中我们列出了迄今为止所有否定的结果。

表 2 未能测出类星体团分布的样品

巡天名称	巡天技术	面积	类星体数目	红移范围	作者
CTIO 21 ^h -04 ^m -40 ^s	prism	15 × (5° × 5°)	174	大多数 Z > 2	Osmer (1981) ^[13]
	grism		108		Weberst (1982)* ^[14]
ROE/ESO SGP	prism AQD	200deg ²	1100 候选者	1.8-2.4	Clowes, Iovino, ^[15] Shaver (1987)
Sculptor [§]	prism	450deg ²	146	有 2/3 的 Z > 1.8	Anderson et al. ^[16] (1938)*
CFHT 8 fields	blue grens	8 × 0.52deg ²	117	有 1/3 的 Z > 1.8	Crampton et al. ^[17] (1987, 1988)*

§ 三组样品取自 Osmer 和 Smith (1980), Arp (1984) 以及 Kunth 和 Sargent (1986)。

* 样品中有某些类星体对和类星体团。

在表 2 中除了 Clowes 等人的结果(仅有类星体的候选者, 无红移值), 其他三组样品虽然在整体上都未发现成团性, 但毫无例外地都找到一些类星体对或类星体团, 表明这些样品也不是完全均匀地分布在空间的。值得提出的一点是有些样品主要是由大红移类星体组成,

正如我们下面要讨论的,类星体团主要存在于小红移类星体之中,因此对这些样品未能检测出成团性也是可以理解的。

最后必须指出,光学选类星体样品存在着许多选择效应,关于样品的完整性问题目前仍是一个引起争议的课题。例如,无缝光谱方法偏向于得到高红移类星体,而UBV方法只适用于低红移类星体。此外,视星等测量的误差,底片的边界效应,星象视宁度的影响……等等都会造成类星体在红移分布和天球分布上的不均匀性。如何在统计上排除或估计这些选择效应,都是需要进一步探索的问题。

三、利用类星体总表的分析结果

在目前所能达到的极限星等和可供利用的大望远镜时间的条件下,一个完整的类星体巡天样品通常只有百余个类星体。由于样品数目较少也使统计分析的结果误差较大。为了增加样品的数目,人们把分析的对象转移到像Hewitt-Burbidge编辑的那种类星体总表[18]上。总表中包含了所有被确认的类星体,总数超过3500个。但是我们知道,像这种类型的星表是把各种各样的巡天结果编辑在一起,是非常不均匀的,不能采用通常的统计分析方法。Shaver首先提出一种新的方法,其基本思想是认为类星体成团效应主要在小尺度范围通过类星体对表现出来,这些类星体对在红移和天球上的坐标都比较接近。与此相反,在红移和天球上位置相差较大的类星体对则被认为是物理上无关联的,因此可以期望它们的分布将是随机的。通过比较这两组类星体的数目,可以确定类星体成团分布的特性。这种方法的优点是通过两组类星体对的比较,有可能把各种选择效应相互抵消掉。Shaver把这种方法应用到Veron[20]星表上,成功地检测出类星体的成团性[19]。

最近我们[21]分析了Hewitt-Burbidge星表,其中包含有3595个具有红移值的类星体。图1画出了小红移差(以速度差表示, $\Delta v < 2500 \text{ km/s}$)与大红移差($3000 \text{ km/s} < \Delta v < 50000 \text{ km/s}$)的类星体数目之比(η)与类星体对的共动坐标投影距离 R 之间的关系。从图1中可以清楚地看到,在较小的距离 R 范围内, η 值明显偏大,而如果类星体在空间是均匀分布的,则 η 值应是围绕

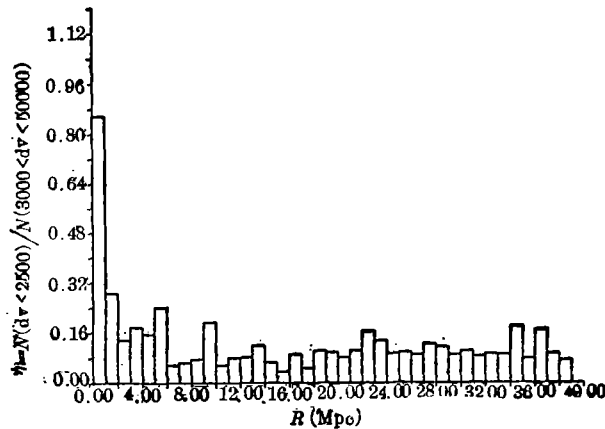


图 1 小红移差和大红移差的类星体对的数目之比(η)与类星体对的投影间距(R)之间的关系

某个常量随机涨落。利用这些类星体对的资料，我们可以计算类星体空间分布的两点相关函数：

$$W_{gg} = \frac{N(R)}{N_e(R)} - 1$$

其中 $N(R)$ 是在 R 范围内成协的类星体对数目，而 $N_e(R)$ 是在类星体均匀分布假定下所预期的类星体对数目。计算所得的两点相关函数值画在图2之中，可见在 $R < 10 \text{ Mpc}$ 范围内，相关函数均大于0，再一次证实了类星体的成团性。Kruszewski[9], Shaver[2]和Anderson, Kunth和Sargent [16] 利用 Veron 星表也得到类似结果。

进一步来说，类星体本身的物理性质与类星体成团的关系也是一个值得研究的有趣课题。例如，射电类星体与射电宁静类星体在成团特性上有哪些不同？通常射电类星体和射电宁静类星体被认为可能来自不同的母体，或是处于演化的不同阶段。观测事实已表明射电类星体与射电宁静类星体在空间分布上确实存在着一些区别：射电类星体可能位于宇宙中物质密度较高的区域。例如：Yee[22]发现射电类星体的类星体-星系两点交叉相关函数较光学类星体的为高；射电陡谱类星体光谱中金属吸收线有聚集在发射线附近的倾向(Anderson et al[23])，许多高红移射电类星体的射电结构显示出扭曲的图象，表明它们可能受到周围物体很强的作用(Barthel[24])。

由于射电类星体的数目相对比较少，因此要利用完整的射电类星体样品直接进行分析则

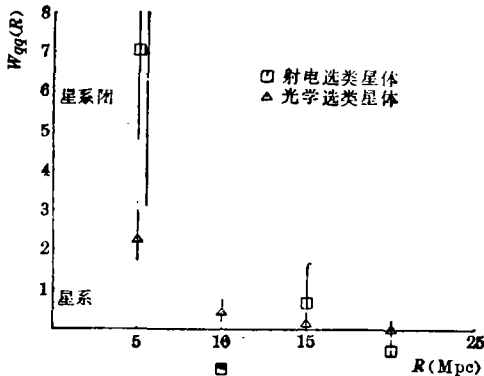


图3 射电选和光学选两类类星体的两点相关函数的比较

系。

Shaver[25]为了验证上述结果，分析了 Veron 星表中 $Z < 1.5$ 的射电类星体，发现了有四

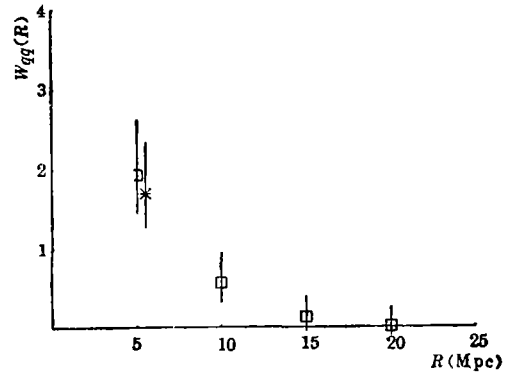


图2 Hewitt-Burbidge 类星体总表中所有类星体的两点相关函数

比较困难，迄今还未有这样的研究成果。但是利用上述方法，分析 Hewitt-Burbidge 星表中的资料，就有可能得到射电类星体成团特性的重要信息。最近褚耀泉、朱杏芬[21]把全部类星体按照它们最初被证认的方法分成四类：R(射电)、O(无缝光谱)、C(UV 过剩)和 X(X-射线)，分别计算了它们的两点相关函数。研究结果(图(3))表明，射电类星体的两点相关函数幅度要比光学选类星体大得多。在图3中我们还标出了星系(gg)和星系团(cc)的相关函数幅度，射电类星体的幅度接近于星系团。一种可能的解释是，射电类星体可能与星系团有某种联系。

对射电类星体的间距 $< 5\text{Mpc}$, 而如果类星体是随机分布的, 则只应有 0.3 对; 如果按光学选类星体成团的同样幅度估算, 也只有 0.6 对。这种过剩产生的机率只有 10^{-8} , 说明射电类星体确实显出更强的成团。

四、类星体团的演化

如果我们假定类星体的分布代表了高红移时宇宙中物质的分布, 那么类星体铺展的宽广的红移范围 (Z 高达 4.33, 相应于整个宇宙历史的 90%) 给我们提供了研究宇宙大尺度结构随时间变化的可能性。1985 年, 方励之等^[5]就首先指出类星体团可能存在着随红移的演化; 即小红移的类星体成团, 而在 $Z > 2$ 范围内不存在类星体团。随后, 不同的研究小组采用不同的方法对不同的样品进行了分析, 例如 Iovino and Shaver^[10], Kruszewski^[9], Anderson et al.^[16] 和 Shaver^[25] 等人, 也都证实了这种倾向。

由于所有的类星体巡天都是对一定的视星等极限而言, 样品中的大红移类星体都是一些本质上较亮的样品。因此存在着一种可能性; 对于 $Z > 2$ 的类星体, 由于漏掉一些由较暗的类星体所引起的选择效应, 从而测不出成团效应。为此我们^[26]着重分析了 Hewitt-Burbidge 星表中 $Z > 2$ 的类星体。发现在 $3-4\sigma$ 水平上 $Z > 2$ 与 $Z < 2$ 类星体的相关函数是有区别的。我们进一步利用双样品的 Kolmogorov-Smirnov 检验来研究 $Z > 2$ 样品中成协的类星体对和不成协类星体对的绝对星等的分布情况。检验结果表明, 这两组类星体对可以认为是从同一个母样品中产生的, 其分布特性没有显著区别。因而排除了因类星体绝对星等不同而造成 $Z > 2$ 和 $Z < 2$ 的类星体空间成团分布的不同。

利用 Hewitt-Burbidge 星表中包含较多类星体的特点, 我们进一步把类星体按红移大小

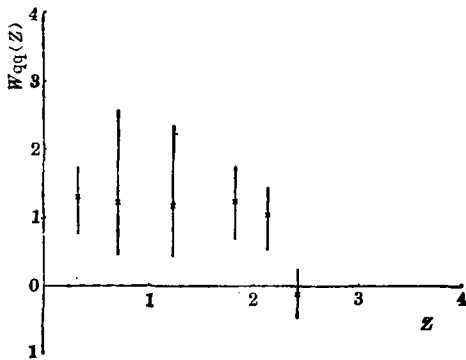


图 4 全部类星体的两点相关函数 $W_{qq}(10\text{Mpc})$ 与红移 (Z) 的关系

分成若干组, 分别计算每一红移间隔内类星体的两点相关函数。图 4 中画出了 6 个红移间隔内的两点相关函数, 每个间隔内样品数目近似相等。从图中可以清楚地看到相关函数幅度随红移的变化, 特别是在 $Z \sim 2$ 处, 相关函数突然变成负值, 而在 $Z < 2$ 的范围内, 相关函数在统计意义上没有显著差别。当然, 在这样的分析中, 红移间隔的选取带有一定任意性。为了减少这种任意性, 我们还选用其他划分间隔的方法。例如我们知道在膨胀宇宙中引力扰动的增长是按 $(1+Z)^{-1}$ 规律变化的, 因此我们选取相等的“增长时间”为划分标准, 即要使每一间隔

内平均的 $(1+Z)^{-1}$ 相等。统计结果表明, 对这种新的划分方法, 类星体的两点相关函数也呈现出同样的变化趋向。当然, 对于类星体团的演化, 特别是要确定具体的演化形式, 以便于与各种大尺度结构形成的理论进行比较, 目前的研究仍处于非常初步的阶段。

五、结 论

近年来对于类星体空间成团分布的研究已取得重要进展。尽管类星体较之星系其成团性并非那样明显,但目前已得到的分析结果表明至少对于小红移类星体,在 $R < 10 \text{ Mpc}$ 范围内成团分布已在 5σ 水平上被确认,更大尺度上的成团性也显现出一些征兆。最新的统计结果表明,类星体成团特性与类星体自身的性质有关,即射电类星体表现出更强的成团倾向。目前这一领域的研究兴趣已开始转向到类星体团可能的演化。这些结果对于星系形成和大尺度结构理论都是极有意义的。

参 考 文 献

- [1] 褚耀泉,方励之, in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge and L. -Z. Fang, p. 627, Reidel, (1987).
- [2] Shaver, P. A., in *Evolution of Large Scale Structure in the universe*, ed. by J. Audouze and A. Szalay, p. 359, Reidel, (1988).
- [3] 褚耀泉,朱杏芬, *Ap. J.*, **267** (1983), 4.
- [4] Boyle, R. J., Fong, R. and Shanks, T., in *Quasars and Gravitational Lenses*, p. 368, (1983).
- [5] 方励之、褚耀泉、朱杏芬, *Ap. S. S.*, **115** (1985), 99.
- [6] Shanks, T., Fong, R., et al, *M. N. R. A. S.*, **203** (1983), 181.
- [7] Shanks, T., Fong, R., et al, *M. N. R. A. S.*, **227** (1987), 739.
- [8] Savage, A., et al., *M. N. R. A. S.*, **207** (1984), 393.
- [9] Kruszewski, A., preprint, (1987).
- [10] Iovino, A., and Shaver, P., *Ap. J.*, **330** (1988), L. 13.
- [11] 褚耀泉, aГpби40i, C., preprint, (1986).
- [12] Gosset, E., Surdet, J. and Swings, J-P., preprint, (1985).
- [13] Osmer, P. S., *Ap. J.*, **247** (1981), 762.
- [14] Webster, A., *M. N. R. A. S.*, **199** (1982), 683.
- [15] Clowes, R. G., Iovino, A. and Shaver, P., *M. N. R. A. S.*, **227** (1987), 921.
- [16] Anderson, N., Kunth, D., and Sargent, W. L. W., *A. J.*, **95** (1988), 644.
- [17] Crampton, D., Cowley, A. P. et al., *Ap. J.*, **314** (1987), 129.
- [18] Hewitt, A. and Burbidge, G., *Ap. J. Suppl.*, **63** (1987), No. 1.
- [19] Shaver, P., *A. Ap.*, **136** (1984), L. 9.
- [20] Veron-Cetty M. -P. and Veron, P., *ESO Scientific Report*, (1987), No. 5.
- [21] 褚耀泉,朱杏芬, *A. Ap.*, **205** (1988), 1.
- [22] Yee, H. K. C., in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt, G. Burbidge, and L. -Z. Fang, p. 685, Reidel, (1987).
- [23] Anderson, S. F., Weymann, R. J., et. al., *A. J.*, **94** (1987), 278.
- [24] Barthel, P. D., in *Quasars*, ed. by G. Swarup and V. K., Kapahi, p. 181, Reidel, (1986).
- [25] Shaver, P., in *Proceedings of Workshop on Optical Survey for quasars*, ed. by P. Osmer et al., p. 265 (1988).

[26] 褚耀泉, 朱杏芬, *A. A. p.*, 215, (1989), 14.

(责任编辑 林一梅)

Spatial Clustering of Quasars

Chu Yaoquan

(*Centre for Astrophysics, University of Science and Technoeogy of China*)

Abstract

Rapid progress has been achieved recently in the studies of spatial clustering of quasars. More and more samples of optical surveys for quasars and general catalogues of quasars have been carefully analysed. The statistical results show that the quasar clustering at low redshift ($Z < 2$) and on small scale ($< 10\text{Mpc}$) has been confirmed at high statistically significant level. There are also some indications of the evolution of quasar clustering with redshift and the dependence of quasar clustering on the type of the quasar.