

星系团演化的Butcher-Oemler效应*

卞毓麟 刘健

(中国科学院北京天文台, 北京 100080)

提 要

Butcher-Oemler 效应是探讨团星系演化的一个重要课题, 它是 Butcher 和 Oemler 于 1978 年首次提出的。十余年来, 对该效应的探究已带动了有关星系团成分和演化的大量实测与理论研究。本文介绍了 Butcher-Oemler 效应的发现、对它的论证与争议以及迄今提出的各种理论解释。

一、引 言

众所周知, 星系团是宇宙中明确无误地表现出动力学束缚特征的最大结构。富星系团更因具有很高的面密度以及拥有大量亮星系, 故能在很远的距离上被证认而成为宇宙学研究中的重要工具^[1,2]。本世纪 70 年代以来, 随着观测技术的改善以及人们对星系演化问题的兴趣与日俱增, 对星系团的研究也开始进入一个新阶段, 其中星系团成员星系的性质与演化就是很重要的一个方面。

1978 年, Butcher 和 Oemler^[3]对两个远处的富星系团(红移 $z \sim 0.4$)作了成员星系的测光研究, 发现其中“蓝”星系数目所占的比例明显高于近距富团的相应值。团星系的这种演化现象, 后来就被称为 Butcher-Oemler 效应, 简称 B-O 效应。十多年来, 对该效应的探索带动了有关星系团成分与演化的大批实测与理论工作。本文对该效应作了较全面的介绍。

二、B-O 效应的提出

1. Butcher 和 Oemler 的开创性工作

Butcher 和 Oemler 最初是为探索 S0 星系的演化而发现 B-O 效应的^[3]。他们的原始想法如下: 迄 70 年代中期已确立了有关星系形态与分布的两项重要观测事实, 即: (1) 对近邻致密星系团的研究表明, 在团的核心部分椭圆星系所占的比例特别大, 其余部分中盘星系所占比例大致保持不变, 但 S0 与旋涡星系之比则随星系密度的增大而增加。(2) 场星系中多数盘星系均为旋涡星系, 但随着星系聚集程度的增高, 旋涡星系所占的比例便逐渐减小, 直到致密星系团的核区所有的盘星系实际上均为 S0。这些事实表明, 在致密区域中, 旋涡星系似乎转化成了 S0, 但转化的本质却不甚了然。一种可能是原星系际介质中的致密区域产生

* 国家自然科学基金资助项目。

1992 年 8 月 15 日收到。

的星系由于恒星形成效率很高而耗尽了那里的气体；另一种可能是致密团中的旋涡星系因与其他星系或与热星系际介质相互作用而被剥夺了气体。上述的不同过程使后来变成了 S0 的星系具有大不相同的演化史，所以若能在遥远星系团中观测处于较早时期的相应星系，就有可能对上述不同假说作出某种判断。当时虽无法直接观测遥远星系团成员星系的形态，却仍可借助于另一项已对近星系团确立的事实(中聚度高、对称性好、呈弛豫特征的星系团的核区仅仅含有椭圆星系和 S0 星系^[4])来探索具有同类特征的远星系团核区的星系成分。在高红移处证认这种团并不困难，若其核区星系的颜色与近距早型星系有显著差异，则为 S0(和/或椭圆星系)的演化提供了有效的证据。

为此，Butcher 和 Oemler^[5]用 KPNO 的 ISIT vidicon 系统对两个高中聚度的类 Coma 遥远富星系团作了 V 和 R 两色测光。这两个团是 Cl 0024 + 1654 ($z = 0.39$) 和包含强射电星系 3C295 的星系团 ($z = 0.46$ ，以下简称 3C295 团)。在 Coma 团的核区，95% 的成员星系均为红的椭圆星系和 S0 星系，而上述两个团中却有着 1/3—1/2 的“蓝”星系，它们具有旋涡星系的颜色。文[3]中对“红”与“蓝”的定义是：在 Cl0024 + 1654 中 $V - R \geq 1.4$ 者、在 3C295 团中 $V - R \geq 1.3$ 者为“红”，否则为“蓝”。该文认为，对上述现象最简单的解释乃是：在过去的 1/3 哈勃时间内，这两个致密富团已有了显著的演化。

这种“与近距团相比，在远星系团中蓝星系比例明显偏高”的现象后来就被称为 B-O 效应。

2. 近距团对照样本的改善

Butcher 和 Oemler 得到的上述结果与当时关于正常星系不可能有如此快速的演化这一普遍认识相差甚远，所以他们认识到必须使导致这一结果的每一个步骤都十分可靠。仅仅将 2 个远团与 1 个近团(即 Coma 团)相比较是很不够的；远近双方都必须拥有足够好的样本，才能使统计结果具有更高的置信度和显著性。为此，他们收集了大部分近距富团的资料^[5]，包括 Virgo 团、Coma 团、以及 Abell 星系团表^[6]中距离级为 0 和 1 的适于此项研究的大部分富团。他们对这 21 个近距团进行分析时定义中聚度 C 为^[5]

$$C = \log(R_{80}/R_{20}) \quad (1)$$

其中 R_n 表示星系投影分布中有 $n\%$ 的星系位于其内的那个圆的半径(圆心是团的中心)。在计算旋涡星系所占的比例时则限于半径为 R_{30} 的范围以内。其理由是：若选取的范围过小则星系数太少，统计的不确定性将会很大；若选取范围过大则会将旋涡星系甚多的外围部分包括进去，从而“稀释”了因团而异的核区成员星系成分的差别。此外，因星系成分与绝对星等稍有相关，故统计时总是选定极限星等比团内最亮成员暗 4 等左右。文献[5]的统计结果表明，所有的近距高中聚度团核区所含的旋涡星系比例均相当低。事实上，除 Virgo 团外，只是在那些无中聚倾向的不规则团中才发现了大量的旋涡星系。上述结果告诉我们：对近处的高中聚度团而言，富含旋涡星系者所占的比例必大大低于 1/21。

将此结果与文献[3]中的两个远星系团相比较，假定远团中的蓝星系都是旋涡星系，则明显看出远团与近团之间确有很大的差异。当然，正如 Butcher 和 Oemler 本人已清楚地看到的那样，发现 Cl0024 + 1654 和 3C295 这两个远团时所用的观测波段在相对于这些团静止的参考系中相当偏蓝，从而造成了有利于发现含有较多蓝星系的团的选择效应。此外，对

远团是观测成员星系的颜色, 对近团则是观测星系的形态, 所以又难以直截了当地比较两者的结果。因此, 为进一步检验 B-O 效应并弄清其实质, 就必须建立更好的星系团样本, 下面即对此作专门介绍。

三、团星系的测光研究

1. Butcher-Oemler 的大样本统计

鉴于上节所述的理由以及对 B-O 效应的异议(详见后文), Butcher 和 Oemler^[7]重新组建了一个红移从 $z = 0.0033$ (Virgo 团)到 $z = 0.54$ (Cl0016+16)、中聚度也不同的星系团样本, 以期通过对这 33 个团的多色测光研究揭示出团星系的演化。在这项研究中, 他们放弃了形态而对团星系统一使用颜色参量来进行统计分析。由于研究的目标是找出团的演化与红移的相关性, 所以“蓝”星系的定义应该满足下述条件: 将一个无演化的团置于不同红移处进行观测, 所得的蓝星系比例必须保持固定的值。为此, 文献[7]作出如下的规定:

(1) 极限星等 选取在静止参考系中(即须对观测资料先作 K 改正)目视绝对星等 $M_V \leq -20$ 的团星系进行统计, 以保证该样本中最遥远的团免受不完备性的影响。

(2) 体积 用于估算蓝星系比例的体积由(考虑到 $M_V \leq -20$ 的) R_{30} 确定。为确定团星系的总数必须估计场星系的密度, 在文献[7]中这是凭藉某个模型星系团的密度轮廓与观测资料相拟合而求得的。如此得到的场密度还被用于改正前景或背景星系的污染, 仅在已有每个星系的光谱观测资料时例外。

(3) 颜色—星等关系 由于较亮的星系颜色较红, 因此定义“蓝”星系时首先要作颜色—星等改正^[8], 即把颜色($J-F$)或($B-V$)转换为某种色指数 CI , 以使每一星等处的颜色直方图极大值均位于相同的 CI 处, 然后将 CI 小于某指定阈值的星系定义为“蓝星系”。由于较亮(较红)和较暗(较蓝)星系的 K 改正是不同的, 所以将团移往高红移处可使颜色—星等平面上代表颜色—星等关系的直线除平移外还有转动。文献[7]把在静止参考系中($B-V$)比颜色分布峰值至少蓝 0.2mag 的星系定义为“蓝星系”。

(4) 蓝星系比例 考虑上述诸因素后, 最后定义蓝星系比例 f_b 为:

$$f_b = \frac{N_b}{N_b + N_r} \quad (2)$$

式中 N_b 和 N_r 分别为在半径 R_{30} 内亮于 $M_V = -20$ 的蓝、红星系数。

文献[7]分析上述 33 个星系团得出的主要结果是: (i) 低红移($z < 0.1$)致密团形成了一个非常均匀的组, 它们的核区中蓝星系的比例极低($f_b \sim 0.03 \pm 0.01$); (ii) $z > 0.1$ 的致密团中蓝星系的比例明显较高, 且随星系团红移的增大而增大(在 $z = 0.5$ 处, f_b 增至 0.25); (iii) 尽管红移是星系团成分最重要的决定因素, 却仍有迹象表明单个团内的过程可能也起了一定的作用; (iv) 有证据表明不规则团中的星系也像致密团内星系那样存在着颜色演化; (v) 近距星系团核区内旋涡星系的颜色有较场旋涡星系为红的倾向。从图 1^[7]可清楚看出星系团内蓝星系比例如何随红移而增高, 且在同一红移处不规则团中的蓝星系比例要比致密团中更高。此外还可看到, 中聚度介乎致密与不规则之间的星系团的成员成分与致密团相似。

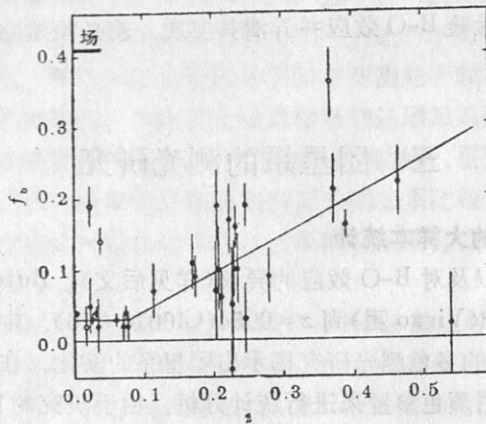


图 1 蓝星系数比例随红移的变化。实心圆点为致密团($C \geq 0.40$)；空心圆圈为不规则团($C < 0.35$)；带点的圆为中介团($0.35 \leq C < 0.40$)^[7]

总之，Butcher 和 Oemler 的一系列工作^[3,5,7,9,10]说明，至少有相当一部分团星系，在过去不太久的时间内($\sim 5\text{Gyr}$)确有强烈的演化。但与此同时，对 B-O 效应的真实性也还存在着异议，并有一系列的问题尚待进一步研究。

2. 对 B-O 效应的异议

在缺少红移资料的情况下，很难解决场星系污染问题。这里存在着两种可能：一是星系团附近的场星系可能被误认为是团成员；一是若某个前景红星系被误判为远星系团成员，则经 K 改正后可以表现为“蓝”星系。所以，在 Butcher 和 Oemler 最初的工作^[3,5]之后，即有人对 Cl0024+1654 和 3C295 这两个团重行研究。Mathieu 和 Spinrad^[11]的结论是，Butcher 和 Oemler 低估了场星系的污染，从而高估了 3C295 团中蓝星系的比例；van den Bergh^[73]也得出了该团无蓝星系超的结论。Wirth 和 Gallagher^[12]利用对弱结构很敏感的底片在两个近星系团中寻找旋涡星系，发现旋涡星系所占的比例比原先估计的高得多，因此相应地削弱了近团与远团之间的差异。Koo^[13]对 $z = 0.54$ 的富团 Cl 0016+16 进行多色测光，结果发现 90% 以上的星系乃是红星系。由此他认为，在遥远富星系团中蓝星系比例偏高并不是一种普遍现象。

Butcher 和 Oemler 正是在这些不同结果发表之后作出其大样本统计的。如上节所示，大样本统计的结果消除了某些疑虑。但 Cl0016+16 依然是一个突出的例外。此后 Koo 等人^[14,15]又对另一个致密富团 IIZw1305.4+2941($z = 0.24$)作了分析，结果再度表明其中心区并不存在过量的蓝星系($f_b = -0.01 \pm 0.07$)。

3. 关于选择效应

鉴于统计研究中的上述歧见，兼之场星系与团星系演化亦有相似之处，Koo^[16]探讨了 B-O 效应的真实性问题，并提出这或许是选择效应所致的种种可能性，要点如下。

(1) 团样本的选取(Koo 名之为 Tail-Does-Not-Wag-the-Dog effect)。文献[7]研究的 $z > 0.3$ 的 4 个团均有独特之处：A370($z = 0.37$)是已知红移最大的 Abell 团，0024+16

($z = 0.39$) 是已知红移最大的 Zwicky 团, 强发射线射电星系 3C295 ($z = 0.46$) 有十余年乃是已知红移最大的星系, 0016+16 ($z = 0.54$) 则因其极富、极红又极暗而为 Kron 所关注, 且为 Spinral 所观测。人们理应选用已经相当了解的团样本作统计研究。然而, 如 Chincari-ni^[17,18] 所言, 只有利用星系、星系群和团、以及超团的现实空间分布和颜色进行足够的模拟计算之后, 方能对样本选择偏倚及污染问题作出确切的评估。

(2) 超级成团性(Koo 名之为 Rich-Get-Richer effect)。由于富团常与别的团相关, 所以随着红移的增大, 富团与非富而较蓝的团由于投影效应而导致视富度增大的几率也随之增大。因而有必要对团附近的天区进行统计分析。

(3) 分光测量容易优先挑选亮天体(Koo 名之为 Sad-Giant effect)。由于最蓝最亮的星系往往是 Seyfert 1 或 2 型星系, 所以, 若对远团进行分光研究时存在着优先观测最蓝最亮天体的倾向, 而在近团中却不难兼及光度较低的星系, 则容易得出远团中蓝亮星系比例较高的倾向性结果。

(4) 团的下落(Koo 名之为 Tuck-in-Your-Tummy effect)。若两个团在视线方向上彼此靠近, 且彼此以甚大的速度落向对方, 则它们在膨胀宇宙中有可能呈现相同的红移; 兼之这两个团视向速度的高斯分布可能部分重叠, 故即使在分光测量中它们亦可能被误判为是单一的团。

(5) “神之指”效应(Finger-of-God effect, 简作 FOG effect)。星系团的速度弥散造成星系团沿视线方向在表观上大大拉长, 从而可使取样体积大于该团的核区达数百倍之巨。由于场星系的平均密度不超过每 100Mpc^3 一个, 故当存在 FOG 效应时也不致造成大的污染。但若所研究的团处在密度甚大的场区, 或在超团中被其他星系团所包围, 则该效应的影响仍可相当显著。此外, 在膨胀宇宙中, 由于任一固定的红移间隔所对应的距离随红移的增大而增大, 所以该效应亦随红移增大而变得愈益显著。

Koo^[16] 的上述想法具有相当的思辨色彩, 且受到了某些批评(例如[19]), 但他提出的问题——颇受青睐的那些星系究竟是星系团本身的成员还是这些星系团置身其中的超团的成员——在日后的研究中仍颇受人重视; 例如, 1992 年 Dressler 和 Gunn^[20] 发表对大批远团星系的测光与分光研究的长篇论文时, 还提到了这一点。

4. 测光研究小结

继 Butcher 和 Oemler 之后, 又有 Couch 和 Newell^[21]、Couch 等^[22]、Koo 等^[14]、Infante 等^[23]、Molinari 等^[24]、Rakos 等^[25,26]、Lilly^[43]、以及 Mellier 等^[74]对一批富团作了测光研究。表 1 给出迄今为研究 B-O 效应已测光的星系团概况及有关参考文献。大部分多色测光研究均支持 Butcher 和 Oemler 的结论, 但尚有两个重要问题需作出更确切的回答, 即:

- (1) 远富团中的蓝星系与正常旋涡星系究竟有何关系?
- (2) 团环境对 B-O 演化现象究竟起着何种作用?

为回答这些问题, 以及解决前景和背景星系的污染问题, 必须由光谱观测确定被研究星系的红移。

表 1 为研究 B-O 效应已作多色测光的星系团

星系团	红移 z	观测波段	Abell 富度级	f_b 及文献
Virgo	0.0033	BV		0.04 ^[7]
Abell 262	0.0164	JF	0	0.02±0.03 ^[7]
Abell 1367	0.0213	JF	2	0.019±0.03 ^[7]
Abell 400	0.0232	JF	2	0.05±0.04 ^[7]
Coma	0.0235	JF		0.03±0.01 ^[7]
Abell 2199	0.0305	JF	2	0.04±0.01 ^[7]
Abell 2634	0.0322	JF	1	0.02±0.04 ^[7]
Hercules	0.0371	JF		0.02±0.04 ^[7]
Abell 2256	0.0601	BV	2	0.03±0.01 ^[7]
Abell 1904	0.0714	JF	2	0.02±0.02 ^[7]
Abell 401	0.0748	JF	2	0.02±0.02 ^[7]
Abell 2670	0.0749	JF	3	0.04±0.01 ^[7]
Cl 0004.8-3450	0.114	JF		0.07±0.04 ^[7]
Abell 2218	0.171	JF	4	0.11±0.04 ^[7]
Abell 1689	0.1747	JF ^[7,21] , BVRIJHK ^[50]	4	0.09±0.03 ^[7] , [21], [50]
Abell 115	0.195	uby	3	[25]
Cluster Group	<0.2>	uvby		0.18±0.05 ^[26]
Abell 520	0.203	JF	3	0.07±0.07 ^[7]
AC 122	0.205	JF ^[21] , BVRIJHK ^[50]		[21], [50]
Abell 963	0.206	JF	3	0.19±0.05 ^[7]
Abell 223	0.207	JF	3	0.10±0.06 ^[7]
AC 121	0.209	JF		[21]
Abell 222	0.211	JF	3	0.06±0.04 ^[7]
Abell 227	0.212	uby	0	[25]
Abell 1942	0.224	JF ^[7,21]	5	0.17±0.05 ^[7] , [21]
Abell 2397	0.224	JF ^[7] , BVRIJHK ^[50]	3	-0.04±0.04 ^[7] , [50]
AC 113	0.224	JF		[21]
AC 116	0.226	JF		[21]
Abell 777	0.226	JF	4	0.05±0.08 ^[7]
Abell 2111	0.229	JF		0.16±0.03 ^[7]
Abell 1963	(0.23)	JF	0	0.10±0.04 ^[7]
Abell 1961	0.232	JF	3	0.10±0.05 ^[7]
AC 106	0.237	JF		[21]
II Zw 1305.4+2941	0.24	UJFN		-0.01±0.07 ^[14,15]
Abell 2645	0.246	JF ^[7,21]	4	0.03±0.05 ^[7] , [21]
Abell 2125	0.2472	JF	4	0.19±0.03 ^[7]
Abell 1525	0.259	JF ^[21] , BVRIJHK ^[50]	3	[21], [50]
Abell 1758	0.2800	JF	3	0.09±0.04 ^[7]
0016.6-2044	0.3	Jr		0.22 ^[23]
AC 118	0.308	JF		[21]
AC 103	0.311	JF		[21]
AC 114	0.312	JF		[21]
Cl 1447+2619	0.369	VR		0.36±0.05 ^[7]
Cl 0909+4407	0.37	gri		[20]

(续表)

星系团	红移 z	观测波段	Abell 富度级	f_b 及文献
Abell 370	0.373	JN ^[7] , JF ^[21] , BR ^[46] , BVRIJHK ^[50] , BVR ^[74]	0	0.21 ± 0.05 ^[7] , [21], [46], [50], 0.13 ^[74]
0947+44	0.378	UVH		[43]
Cl 0949.9+4409	0.385	uvby		[26]
Cl 0024+1654	0.39	VR ^[7] , gri ^[20] , JF ^[21] , uvby ^[26] , UVH ^[43] , BVRIJHK ^[50]		0.16 ± 0.02 ^[7] , [20], [21], [26], [43], [50]
Cluster Group	<0.4>	uvby		0.35 ± 0.04 ^[26]
Cl 0939.7+4713	0.402	gri ^[20] , uvby ^[26]		[20], [26]
Cl 0303+1706	0.42	gri		[20]
2158+0351	0.45	gri ^[24] , uvby ^[26]		0.30 ± 0.13 ^[24] , [26]
3C295	0.465	VR ^[7] , JF ^[11] , gri ^[20] , uvby ^[26] , UVH ^[43]		0.22 ± 0.05 ^[7] , <0.3 ^[11] , [20], [26], [43]
Cl 0016+16	0.54	UBVI ^[7] , UBVI ^[13] , UVH ^[43]		0.02 ± 0.07 ^[7] , <0.1 ^[13] , [43]
Cl 1601+4253	0.54	gri		[20]
Cl 0016+1609	0.55	gri		[20]
0231+01	0.56	UVH		[43]
0055-279	0.57	BVRI		0.32 ± 0.13 ^[22]

四、团星系的光谱观测

1. 光谱观测的主要结果

只有测出红移, 才有可能准确判定 B-O 现象中的有关星系是否属于星系团, 并进而正确地估算 f_b 。在这方面, 成绩最卓越的当推 Dressler 和 Gunn 等人的一系列观测、分析、以及评述^[2, 19, 20, 27-39]。

Dressler 和 Gunn 等人^[27, 28, 29]从 1981 年开始率先测量了 3C295 团和 Cl 0024+1654 中部分星系的红移, 发现 3C295 团中所测的 6 个红星系均是团成员, 但 17 个被测蓝星系中只有 6 个是团成员^[27, 28], 由此得出的 f_b 约为 20%, 仅为文献[3]原估值之一半。该结果表明原先对此团成员的判定有严重污染, 这与文献[11]的结论相吻合。Cl 0024+1654 的情况较好, 在 22 个被测蓝星系中有 14 个是团成员, 被测的红星系亦皆属团。据此推得 f_b 约为 45%, 略低于文献[3, 5]的最初估值。

Butcher 和 Oemler^[9]观测了文献[7]中的 33 个团之一的不规则团 Cl 1447+2619 ($z = 0.37$), 发现 4 个被测红星系均为团成员, 12 个被测蓝星系中有 7 个属团。据此估得 f_b 大于 31%, 与文献[7]当初的估计 36% 亦基本相符。

嗣后 Lavery 和 Henry^[40, 41, 42], Couch 和 Sharples^[44], Mellier^[45], Mellier 等^[74], Soucail 等^[48], Newberry 等^[47, 48], Pickles 和 van der Kruit^[49, 50] 以及 Dressler 和 Gunn^[19] 又观测了一批中、高红移的团。另一方面, Vigroux 等^[51] 则给出了对 3 个近距团的光谱研究结果, 其中的 Pegasus I 也表现出类似于远团的 B-O 效应行为。

最近 Dressler 和 Gunn^[20] 发表了他们多年来测得的远团样本的光谱观测资料, 给出 7

表 2 为研究 B-O 效应已作光谱观测的星系团

星系团	红移 z	Abell 富度级	f_a 或 f_b 及文献*
Virgo	0.0033		[51]
Abell 262	0.0164	0	^a 10% ^[51]
Pegasus I			^a 50% ^[51]
Abell 1689	0.185	4	[50]
Abell 520	0.20	3	[47]
AC 122	0.205		[50]
Abell 222	0.21	3	>0.08 ^[47]
Abell 223	0.21	3	0.11 ± 0.04 ^[40] , >0.05 ^[47]
Abell 963	0.21	3	0.23 ± 0.04 ^[40] , [41]
Abell 2397	0.219	3	[50]
Abell 2111	0.23	3	0.16 ± 0.03 ^[40] , [41]
Abell 777	0.23	4	[48]
Abell 2125	0.247	4	[41]
Abell 2645	0.25	4	>0.20 ^[47]
Abell 1525	0.259	3	[50]
Abell 1758	0.28	3	>0.06 ^[47]
AC 118	0.31		25% ^[44]
AC 114	0.31		29% ^[44]
AC 103	0.31		28% ^[44]
Abell 370	0.37	0	[20], 0.21 ± 0.04 ^[42] , 0.13 ^[45] , [46], (0.0) ^[47] , [60], [74]
Cl 0909+4408	0.37		[20]
Cl 1447+2619	0.38		>31% ^[9]
9HFC127	0.38		^a 27% \pm 16% ^[19]
Cl 0024+1654	0.39		[20], >20% ^[29] , [50]
9HFa β	0.39		^a 27% \pm 8% ^[19]
Cl 0024+24	0.40		^a 22% \pm 9% ^[19]
Cl 0939+4713	0.41		[20]
Cl 0303+1706	0.42		[20]
3HFC12	0.42		^a 34% \pm 17% ^[19]
3C295	0.46		20% ^[28] , ^a 39% \pm 18% ^[19] , [20]
Cl 0016+16	0.54		^a 34% \pm 17% ^[19]
16HFB β	0.54		^a 37% \pm 15% ^[19]
Cl 1601+4253	0.54		[20]
Cl 0016+1609	0.55		[20]

* 标明 a 者为 f_a 值, 否则为 f_b . () 中为不甚确定的值.

个团 ($0.35 < z < 0.55$) 所在天区的约 2000 个星系的位置、测光参数 (r 星等、 $g-r$ 和 $r-i$ 两种颜色)、面亮度、测光轮廓类型以及其中部分星系的红移。

表 2 给出有关 B-O 效应的光谱测量信息及有关文献。总的说来, 光谱研究肯定了 B-O 效应的存在。

2. 蓝星系的本质问题

Butcher 和 Oemler 起初设想远团中的蓝星系是 Sb 或更晚型的正常旋涡星系^[8], 并试图用近处场星系的颜色—形态的平均关系来估计远团蓝星系中旋涡星系所占的比例^[6], 以建

立团内旋涡星系所占比例随回顾时间而变化的关系。这种做法是很不严格的。要揭示远团蓝星系的本质, 更重要的是研究它们的光谱特征。

Dressler 和 Gunn^[28]在 3C295 团中观测的 6 个蓝星系, 无一具有近距正常旋涡星系的光谱。其中 3 个是活动星系核(Seyfert 1 和 2 型星系), 另外 3 个显示出大规模星暴的迹象。在 Cl 0024 + 1654 的 14 个被测蓝星系中, 却大多具有类似正常旋涡星系的光谱, 只有 3 个具有活动星系核的光谱特征, 且未发现星暴星系。

由此可见 B-O 效应中涉及的远团蓝星系实际上可能是三种不同类型的星系, 即:

- (1) 恒星连续形成的正常旋涡星系;
- (2) 具有活动星系核光谱特征的星系;
- (3) 短时期内有大批恒星形成的星暴星系。

此后的一系列光谱观测也都支持上述结果([9, 19, 29], 以及[40—51]中的许多文章)。

Dressler 和 Gunn^[33, 37]把光谱观测表明正在进行或不久以前发生星暴的星系称为“活性星系”(“active galaxies”)*, 而将在过去 5Gyr 中几乎无恒星形成迹象的星系——即现时的椭圆或 S0 星系——称为“惰性星系”(“passive galaxies”)。“活性星系”又可分为两类, 即(a)具有发射线的星系, 包括前述三种不同类型的蓝星系, 以及(b)具有强巴耳末吸收而几乎或全然没有发射线的星系, 它们在静止参考系中的颜色(B-V)要比椭圆星系蓝 0.2—0.3mag。上述(b)类星系的颜色和光谱特征相当于在一个椭圆星系(E)的光谱中再加上 A 型主序星的光谱, 故被称作“E + A”星系。这种光谱特征表明此类星系中的恒星形成率在观测时刻之前大约 1Gyr 显著地增高, 因而上述作者又称其为“星暴后星系”(“post-starburst galaxies”)。对团星系的上述分类可概括如表 3。与简单地将团星系分为蓝红两色相比, 用“活性”和“惰性”星系的概念可以更恰当地描述和诠释 B-O 效应; 我们引用表 4 所示的 Gunn 和 Dressler^[19, 36, 37]对 7 个团的研究结果来说明这一点。

表 3 团星系的分类

团星系	“活性星系”	有发射线的星系	正常旋涡星系: 连续地形成恒星。
			星暴星系: 短期内有大批恒星形成。
			活动星系核: 1 或 2 型赛弗特星系。
		“E + A”星系: 即星暴后星系, 有强巴耳末吸收, 几乎无发射线。	
	“惰性星系”	——近期内无显著的恒星形成(如今的 E 和 S0 星系)。	

表 4 说明这些团中“活性”星系的比例 f_a 确实相当高($\sim 30\%$), 且在误差范围内不因团而异。特别值得注意的是, 当初 Koo^[13]曾因发现高红移团 Cl 0016 + 16($z = 0.54$)中蓝星系比例甚低而对 B-O 效应提出异议, 表 4 则表明该团中“活性星系”的比例其实是相当高的。此后, Dressler^[38]报道他们在表 4 的样本中又增添了新的观测结果: 在已获得光谱的 249 个星系中, 有 77 个“场”星系(它们本身仍有可能位于前景或背景低密度群中), 172 个团星系。在这 172 个团星系中, 23 个是“E + A”, 37 个有强发射线, 两者之和共 60 个,

* 此处带引号的“active galaxies”与通常不加引号的 active galaxies(活动星系)含义不同, 故遵其内涵译为“活性星系”。

表 4 7 个星系团中“活性”星系的比例 f_a

星系团	红移 z	$f_a(\%)$	“E+A”	em+AGN
9HFC127	0.378	27±15	3	1
9HF $\alpha\beta$	0.391	27±8	2	10
Cl 0024+24	0.407	22±9	6	1
3HFC12	0.419	34±17	1	4
3C295	0.467	39±18	3	3
16HF $\beta\beta$	0.540	37±15	3	5
Cl 0016+16	0.546	31±10	7	5

相应的 f_a 为 $30 \pm 4\%$ ；其余的 112 个是“惰性星系”，其光谱与现时的 E 和 S0 星系无甚差异。上述 $f_a \sim 30\%$ 的值远比低红移团的 f_a 值大得多。例如，与 Dressler 等人^[52]对 $z \sim 0.04$ 的 1 000 多个团星系的统计结果相比，发射线星系的比例约为低红移团的 3 倍，“E+A”的比例则要高出一个量级。

下面我们将讨论前述所有结果的可能的理论解释。

五、B-O 效应的理论解释

如前所述，迄今的研究工作已基本证实 B-O 效应的真实性。Gunn^[37]阐明了人们如何根据 E+A 星系的强巴耳末吸收线以及许多发射线星系[O II]线的高等值宽度 $W_{[O II]} \sim 20 \text{ \AA}$ 而将这些星系证认为星暴或星暴后星系，更详细的讨论可参阅文献[28]和[44]。Gunn 和 Dressler^[38]指出，在相同红移处的不同星系团中，“活性星系”占有近乎相同的比例($\sim 30\%$)。这一事实表明，Koo^[16]关于团样本选取的偏倚导致虚假的 B-O 现象(见本文第三部分第 3 节)的想法并不切合实际，因为倘若真如 Koo 所说的那样，则不同的团所表现的行为就会大不相同，但事实正好与之相反。然而，Trevese^[53]却提出了反问：“一种被认为由星系的环境所确定的现象为什么非得随着宇宙时(即红移)同步变化呢？”目前人们对造成 B-O 现象的物理机制尚未取得共识。

Dressler 和 Gunn^[28]提出了冲压诱发的恒星形成模型，其要点为：当富气星系从富星系团外围向团中心区内落时，受到团内高温气体的冲压作用，稠密的冷星际云因而遭到快速压缩(云际温相介质则有可能被剥离^[54])，迅速形成大量恒星，造成星暴等可观测现象。该模型得到下述观测事实的支持。首先，“活性星系”似乎较集中于接近富团中心而又未达到中心的区域。例如，在 Cl0016+16 中，“活性星系”似乎构成了围绕中心区半径 $\sim 1 \text{ Mpc}$ 的环^[33]。其次，“活性星系”的平均速度弥散度要比“惰性星系”高出约 50%^[35]。Newberry 等^[48]认为冲压剥夺机制或星暴活动机制都与 B-O 团中观测到的 E+A 谱相符，且认为许多团中的 E+A 星系可能由冲压剥夺机制引起，场中的 E+A 星系则可能由星暴活动引起。

另一方面，Dressler 和 Gunn^[28]也提出了星系相互作用产生 B-O 效应的可能性。相应的观测检验需要有很高的角分辨率。Lavery 和 Henry^[41]根据红移约为 0.2 的蓝团星系的成像观测进行统计研究，发现蓝发射线星系似乎比红星系具有近得多的“伴”星系，从而支持

了星系—星系相互作用乃是强化恒星形成的主要机制这一假说; 几个星系本身的外貌特征也支持这种观点。Lavery^[55]报道了更多的成像观测结果(分辨率高达 $0''.8$), 并指出至少某些蓝星系是星系—星系相互作用的结果, 且某些星暴星系的最终形态乃是旋涡星系。早先 Toomre 和 Toomre^[56]曾指出, 星系若能产生强引力效应的相互作用, 则这些相互作用星系必须具有甚低的相对速度。文献[41]则对此作了重新解释, 认为文献[56]谈及的乃是产生“桥”与“尾”等星系畸变的必要条件, 而当相互作用星系的相对速度远大于内禀速度时, 虽不会产生“桥”和“尾”等特征, 却仍能诱发恒星形成。文献[41]还认为 Cl0016+16 中“活性”星系呈环状分布可能与团星系分布密度的次峰值有关, 那里的局域密度高致能使相互作用的几率增大。

上述两类模型探讨的是“活性”星系与富团环境的关系。为了查明 B-O 效应是否可能由星系内禀性质随宇宙时的演化所致, 必须将团星系与场星系的演化作细致的比较。Koo^[57,58]和 Tyson^[59]等人的巡天结果表明场星系从 $z \sim 0.5$ 至今亦有显著的演化效应。这与富团成员星系的显著演化有何关系则尚待进一步深究。

表征恒星形成的另一项指标是所谓的 4000 \AA 间断(即 4000 \AA 不连续性)的幅度 $D(4000)$ 。在这方面, 先前的研究工作有[60,61,62,63,33,34]等。Dressler 等^[38]的新结果表明, 当 $z \geq 0.7$ 时, 甚至最红的(也许可认为是最老的)团星系也显示出演化证据; 据此对这些星系中大规模恒星形成的时间所作出的限制大体上为 $2 < z < 5$ 。另外, 如文献[64]所述, 紫外颜色也是恒星形成活动的良好标志, 这方面的工作目前仍处于较初期阶段, 此处不再赘述。

六、结 束 语

关于 B-O 效应, 星系团性质与演化的相关问题以及其宇宙学含义, 尚可参阅多种文献, 例如[65~71]等。导致 B-O 效应的决定性因素目前仍无定论, 而一些新的观测事实又不时地引出一些新的问题; Oegerle 等人^[72]不久前发现一个红移仅为 0.0875 的 E+A 星系便是很有趣的一例。为了更深刻地理解团星系的演化问题, 就观测而言尚需作出如下的努力:

(1) 团成员的准确判定, 首先是更多的红移测量。

(2) 高红移团星系与场星系的形态观测, 至今这仍是所缺少的一个重要环节。它将有助于查明星系颜色和光谱的演化与形态演化的关系, 特别是与星系盘和核球之形成的关系; 有助于查明星系合并所起的作用以及星暴星系的确切形态等等。这应是空间望远镜的重要任务之一。

(3) 建立更大更好的团星系样本。它应包含从紫外到近红外的光谱和颜色资料, 并据此确定现时发现的演化趋势可靠性究竟如何, 以及寻找因团而异之类的二级效应。对于研究 $z \sim 1$ 的星系团而言, 未来的 8—10m 级望远镜将起到很关键的作用。此外, 这些望远镜还将取得一些众所瞩目的天体的高分辨高信噪比光谱, 它们将对恒星形成史模型给出更有说服力的论据。

(4) 若有可能, 则应建立某种更有代表性的在各种环境下的高红移星系样本, 例如, 在一个天区中完备地挑出场星系、团星系, 以及超团星系进行横向与纵向的比较研究。但是,

能否获得如此大量的望远镜观测时间则似成问题。

参 考 文 献

- [1] Bahcall, N. A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 15 (1977), 505.
- [2] Dressler, A., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 22 (1984), 185.
- [3] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Ap. J.*, 219 (1978), 18.
- [4] Abell, G. O., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 3 (1965), 1.
- [5] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Ap. J.*, 226 (1978), 559.
- [6] Abell, G. O., *Ap. J. Suppl.*, 3 (1958), 211.
- [7] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Ap. J.*, 285 (1984), 426.
- [8] Sandage, A. and Visvanathan, N., *Ap. J.*, 225 (1978), 742.
- [9] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Nature*, 310 (1984), 31.
- [10] Butcher, H. and Oemler, A. Jr., *Ap. J. Suppl.*, 57 (1985), 665.
- [11] Mathieu, R. D. and Spinrad, H., *Ap. J.*, 251 (1981), 485.
- [12] Wirth, A. and Gallagher, J. S., *Ap. J.*, 242 (1980), 469.
- [13] Koo, D. C., *Ap. J.*, 251 (1981), L75.
- [14] Koo, D. C. et al., *Ap. J.*, 333 (1988), 586.
- [15] Trevese, D. et al., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 239, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [16] Koo, D. C., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 275, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [17] Chincarini, G., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 217, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [18] Chincarini, G., in *Morphological Cosmology*, ed. by P. Flin, and H. W. Duerbeck, p. 29, Springer-Verlag, (1989).
- [19] Dressler, A. and Gunn, J. E., in *Large Scale Structures of the Universe*, ed. by J. Audouze, et al., p. 311, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [20] Dressler, A. and Gunn, J. E., *Ap. J. Suppl.*, 78 (1992), 1.
- [21] Couch, W. J. and Newell, E. B., *Ap. J. Suppl.*, 56 (1984), 143.
- [22] Couch, W. J., Shanks, T. and Pence, W. D., *M. N. R. A. S.*, 213 (1985), 215.
- [23] Infante, L., Pritchet, C. and Quintana, H., *A. J.*, 91 (1986), 217.
- [24] Molinari, E., Euzzoni, A. and Chincarini, G., *M. N. R. A. S.*, 246 (1990), 576.
- [25] Rakos, K. D., Fiala, N. and Schombert, J. M., *Ap. J.*, 328 (1988), 463.
- [26] Rakos, K. D., Schombert, J. M. and Kreidl, T. J., *Ap. J.*, 377 (1991), 382.
- [27] Dressler, A. and Gunn, J. E., *Ap. J.*, 263 (1982), 533.
- [28] Dressler, A. and Gunn, J. E., *Ap. J.*, 270 (1983), 7.
- [29] Dressler, A., Gunn, J. E. and Schneider, D. P., *Ap. J.*, 294 (1985), 70.
- [30] Bothun, G. D. and Dressler, A., *Ap. J.*, 301 (1986), 57.
- [31] Gunn, J. E., Hoessel, J. G. and Oke, J. B., *Ap. J.*, 306 (1986), 30.
- [32] Dressler, A., in *Spectral Evolution of Galaxies*, ed. by C. Chiosi and A. Renzini, p. 375, Reidel, Dordrecht, (1986).
- [33] Dressler, A., in *Nearly Normal Galaxies*, ed. by S. M. Faber, p. 276, Springer-Verlag, (1987).
- [34] Dressler, A. and Shectman, S. A., *A. J.*, 95 (1988), 284.
- [35] Dressler, A., in *Cosmology and Particle Physics*, ed. by L. Z. Fang, p. 141, Gordon and Breach Science Publishers, (1988).
- [36] Gunn, J. E. and Dressler, A., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 227, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [37] Gunn, J. E., in *The Epoch of Galaxy Formation*, ed. by C. S. Frenk et al., p. 167, Kluwer, Dordrecht, (1989).
- [38] Dressler, A. and Gunn, J. E., in *Evolution of the Universe of Galaxies: Edwin Hubble Centennial Symp.*, ed. by R. G. Kron, p. 200, ASP, San Francisco, (1990).
- [39] Gunn, J. E., in *Clusters of Galaxies*, ed. by W. R. Oegerle, M. J. Fitchett and L. Danly, p. 341, Cambridge Univ. Press, (1990).

- [40] Lavery, R. J. and Henry, J. P., *Ap. J. Lett.*, 304 (1986), L5.
- [41] Lavery, R. J. and Henry, J. P., *Ap. J.*, 330 (1988), 596.
- [42] Henry, J. P. and Lavery, R. J., *Ap. J.*, 323 (1987), 473.
- [43] Lilly, S. J., *M. N. R. A. S.*, 229 (1987), 573.
- [44] Couch, W. J. and Sharples, R. M., *M. N. R. A. S.*, 229 (1987), 423.
- [45] Mellier, Y., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 245, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [46] Soucail, G. et al., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 73 (1988), 471.
- [47] Newberry, M. V., Kirschner, R. P. and Boroson, T. A., *Ap. J.*, 335 (1988), 629.
- [48] Newberry, M. V., Boroson, T. A. and Kirschner, R. P., *Ap. J.*, 350 (1990), 585.
- [49] Pickles, A. J., in *The Epoch of Galaxy Formation*, ed. by C. S. Frenk et al., p. 191, Kluwer, Dordrecht, (1989).
- [50] Pickles, A. J. and van der Kruit, P. C., *Astron. Astrophys. Suppl.*, 91 (1991), 1.
- [51] Vigroux, L., Boulade, O. and Rose, J. A., *A. J.*, 98 (1989), 2044.
- [52] Dressler, A., Thompson, I. B. and Shectman, S., *Ap. J.*, 288 (1985), 481.
- [53] Trevese, D., in *Morphological Cosmology*, ed. by P. Flin, and H. W. Duerbeck, p. 71, Springer-Verlag, (1989).
- [54] Young, J. S., in *Star Forming Regions*, ed. by M. Reibert and J. Jugaku, p. 557, Reidel, Dordrecht, (1987).
- [55] Lavery, R. J., in *Dynamics and Interactions of Galaxies*, ed. by R. Wieden, p. 30, Springer-Verlag, (1990).
- [56] Toomre, A. and Toomre, J., *Ap. J.*, 178 (1972), 623.
- [57] Koo, D. C., *Ap. J.*, 311 (1986), 651.
- [58] Koo, D. C., in *Evolution of the Universe of Galaxies: Edwin Hubble Centennial Symp.*, ed. by R.G. Kron, p. 268, ASP, San Francisco, (1990).
- [59] Tyson, J. A., *A. J.*, 96 (1988), 1.
- [60] Spinrad, H., in *Objects of High Redshift*, ed. by G. O. Abell and P. J. E. Peebles, p. 39, Reidel, Dordrecht, (1980).
- [61] Spinrad, H., *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 98 (1986), 269.
- [62] Hamilton, D., *Ap. J.*, 297 (1985), 371.
- [63] Kimble, R. A., Davidsen, A. F. and Sandage, A. R., *Astrophys. Space Sci.* 157 (1989), 237.
- [64] Mac Laren, I., Ellis, R. S. and Couch, W. J., *M. N. R. A. S.*, 230 (1988), 249.
- [65] Thompson, L. A., in *Clusters and Groups of Galaxies*, ed. by F. Mardirossian et al., p. 113, Reidel Publishing, (1984).
- [66] Sandage, A., in *Observational Cosmology*, ed. by A. Hewitt et al., p. 1, Reidel, Dordrecht, (1987).
- [67] Ellis, R. S., in *Towards Understanding Galaxies at Large Redshift*, ed. by R. G. Kron and A. Renzini, p. 147, Kluwer, Dordrecht, (1988).
- [68] Dagkesamanskii, R. D. and Konyukov, M. V., in *Clusters of Galaxies and Extragalactic Radio Sources*, ed. by A. D. Kuz'min (transl. by P. Makinen), p. 1, Nova Science Publishers, (1990).
- [69] 潘容士, 赵君亮, 刘汝良, *天文学进展*, 9 (1991), 211.
- [70] Giovanelli, R. and Haynes, M. P., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 29 (1991), 499.
- [71] Peebles, P. J. E. et al., *Nature*, 352 (1991), 769.
- [72] Oegerle, W. R., Hill, J. M. and Hoessel, J. G., *Ap. J. Lett.*, 381 (1991), L9.
- [73] van den Bergh, S., *Ap. J.*, 265 (1983), 606.
- [74] Mellier, Y. et al., *Astron. Astrophys.*, 199 (1988), 13.

(责任编辑 林一梅)

On the Butcher-Oemler Effect in the Evolution of Cluster Galaxies

Bian Yulin Liu Jian

(Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The Butcher-Oemler effect has been a very attractive topic related to the evolution of cluster galaxies since the Butcher and Oemler's pioneer paper was published in 1978. Comprehensive studies on it have brought on a variety of observational and theoretical works with regard to population and evolution of galaxy clusters. In this article, the discovery, evidences, controversies, and different interpretations concerning this effect are reviewed.